

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS A.C. SIMÕES
CENTRO DE TECNOLOGIA

JÚLIO CÉSAR MARTINIANO LEITE

**OBTENÇÃO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE
FIBRA DE POLIETILENO DE ALTO MÓDULO**

Maceió
2024

JÚLIO CÉSAR MARTINIANO LEITE

**OBTENÇÃO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE
FIBRA DE POLIETILENO DE ALTO MÓDULO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Correia
Gomes

Coorientadora: Ma. Priscila de Souza Maciel

Maceió

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB-4/661

L533o Leite, Júlio César Martiniano.
Obtenção de concreto de ultra alto desempenho com adição de fibra de polietileno
de alto módulo / Júlio César Martiniano Leite. – 2024.
62 f. : il.

Orientador: Paulo Cesar Correia Gomes.

Coorientadora: Priscila de Souza Maciel.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil) – Universidade
Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 59-62.

1. Concreto de ultra alto desempenho. 2. Fibra de polietileno (Alto módulo).
3. Compósito. I. Título.

CDU: 693.541.56

JÚLIO CÉSAR MARTINIANO LEITE

**OBTENÇÃO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE
FIBRA DE POLIETILENO DE ALTO MÓDULO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Colegiado do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Alagoas como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Data de aprovação 21/11/24



Documento assinado digitalmente

PAULO CESAR CORREIA GOMES

Data: 04/12/2024 09:31:42-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Cesar Correia Gomes
(Universidade Federal de Alagoas)



Documento assinado digitalmente

PRISCILA DE SOUZA MACIEL

Data: 02/12/2024 18:53:50-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ma. Priscila de Souza Maciel
(Universidade Federal de Alagoas)



Documento assinado digitalmente

KARLISSON ANDRE NUNES DA SILVA

Data: 02/12/2024 16:15:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Karlisson André Nunes da Silva
(Universidade Federal de Alagoas)



Documento assinado digitalmente

CASSIA VANESSA ALBUQUERQUE DE MELO

Data: 02/12/2024 11:16:02-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Cássia Vanessa Albuquerque de Melo
(Universidade Federal de Alagoas)

*“Queria que houvesse uma maneira de saber que você estava
nos bons velhos tempos antes de realmente deixá-los”*

Ed Helms (2013)

AGRADECIMENTOS

Não poderia iniciar esta seção de agradecimentos que não fosse por Eraldina Vieira Leite e Marcos César Martiniano Leite. É difícil até encontrar palavras para expressar o quanto toda a confiança e o amor que recebi deles foram fundamentais para que eu me tornasse quem sou hoje. Eles me ensinam diariamente sobre valores, a importância do trabalho árduo e a resiliência que sonho um dia conquistar plenamente. Se eu conseguir retribuir e orgulhá-los tanto quanto me orgulho deles, sentirei que cumpri meu papel como filho.

Agradeço também à minha namorada, que foi essencial para o desenvolvimento da minha maturidade e responsabilidade. Mesmo nos momentos mais difíceis, em que eu tentava não demonstrar o que sentia, ela sabia como me acolher e nunca desistia de me animar. Sem ela, não sei se essa caminhada teria sido possível.

Desde o início, a graduação mostrou que exige serenidade e dedicação rigorosa. Ao longo desse processo, aprendi o valor das pessoas ao meu redor, e posso dizer que fui muito afortunado: conheci pessoas maravilhosas, tive sorte com as turmas, no estágio e na iniciação científica. Embora eu nem sempre demonstre, tenho muito carinho e respeito por todos que me acompanharam no dia a dia dessa jornada. Sempre houve alguém disposto a me ajudar e superar comigo os desafios mais difíceis. Obrigado, amigos e colegas.

Falando em desafios, este trabalho de conclusão destacou-se como um dos mais importantes. Graças à orientação e paciência da Priscila Maciel, que acreditou em mim, consegui, aos trancos e barrancos, alcançar um resultado satisfatório. Além disso, as ideias e demandas do professor Paulo César foram essenciais para que eu compreendesse o processo e o significado de ser engenheiro. A eles, minha eterna gratidão.

Por fim, agradeço aos familiares que acompanharam minha trajetória de longe. Mesmo com o passar do tempo, sempre me trataram com carinho e me fizeram sentir o sobrinho, neto ou primo querido. Em especial, dedico minha gratidão à minha avó, que não pôde ver até onde cheguei, mas que nunca me demonstrou nada além de amor e um sorriso contagiante que carregou comigo até hoje.

RESUMO

No desenvolvimento de novas tecnologias para a construção, destaca-se o concreto de ultra alto desempenho (*ultra-high performance concrete* - UHPC). Para ser caracterizado como tal, o UHPC precisa atender os parâmetros normativos de espalhamento, resistência à tração e compressão, sendo esses, 270mm, 6MPa e 120MPa, respectivamente, aos 28 dias. Em sua composição, é comum uma alta dosagem de finos, uso de aditivos químicos e adições minerais, assim como o uso de fibras. Esta garante uma melhor resistência à tração e tenacidade. Diante disto, o estudo teve como objetivo obter o UHPC com uso de fibras de polietileno de alto módulo (*high-modulus polyethylene fiber* - HMPE). Para isso, utilizou-se o UHPC de Referência (UHPCR), sem fibras atendendo as caracterizações de UHPC, determinado em estudos prévios, para introdução das fibras HMPE. Para obtenção do UHPC reforçado com fibras (UHPCFR), foi necessário desenvolver um procedimento de mistura utilizando misturadores e métodos eficientes para garantir a homogeneização e mistura das fibras. Inicialmente para sua introdução, a HMPE passou por um processo de corte para um comprimento de 15mm e foi utilizada nas proporções de 0,10% e 0,15%, em relação ao volume de aglomerantes. Foram realizados ensaios de espalhamento, no estado fresco e, no estado endurecido, e determinadas as resistências à compressão, resistência à tração na flexão e tenacidade, com corpos de provas cilindros (resistência à compressão) e prismáticos (resistência à tração na flexão e tenacidade). Os resultados obtidos mostraram que a adição de fibras promoveu melhorias significativas na resistência à tração na flexão e tenacidade, destacando o potencial da fibra, quando incorporada ao UHPC.

Palavras-chave: concreto de ultra alto desempenho; fibra de polietileno de alto módulo; compósito.

ABSTRACT

In the development of new technologies for construction, ultra-high performance concrete (UHPC) stands out. To be characterized as such, UHPC must meet regulatory parameters for spread, tensile strength, and compressive strength, which are 270 mm, 6 MPa and 120 MPa, respectively, at 28 days. Its composition commonly includes a high dosage of fine materials, the use of chemical additives and mineral admixtures, as well as the use of fibers, which ensures better tensile strength and toughness. In light of this, the study aimed to obtain UHPC using high-modulus polyethylene (HMPE) fibers. For this purpose, a reference UHPC without fibers was used, meeting UHPC characterizations established in previous studies, to which HMPE fibers were added. To obtain fiber-reinforced UHPC (UHPCFR), it was necessary to develop a mixing procedure using efficient mixers and methods to ensure homogeneity and fiber dispersion. Initially, for its introduction, HMPE was cut to a length of 15 mm and used in proportions of 0.10% and 0.15% relative to the volume of binders. Tests for spread in the fresh state and, in the hardened state, compressive strength, flexural tensile strength, and toughness were performed using cylindrical specimens (for compressive strength) and prismatic specimens (for flexural tensile strength and toughness). The results obtained showed that the addition of fibers significantly improved flexural tensile strength and toughness, highlighting the fiber's potential when incorporated into UHPC.

Keywords: ultra-high performance concrete; high-modulus polyethylene fiber; composite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fachada do Ministério das Relações Exteriores, São Paulo	18
Figura 2 - Habitação construída utilizando placas de UHPC	19
Figura 3 - Efeito parede e afastamento	20
Figura 4 - Mudança das concentrações de tensões com o reforço de fibras.....	22
Figura 5 - Critério da JSCE SF-4 (1984) para determinação da tenacidade.....	23
Figura 6 - Diferentes tipos de fibras	24
Figura 7 - Fibras de aço preparadas.....	25
Figura 8 - Fibra de aço corroída na fissura do concreto	26
Figura 9 - Fibra HMPE em rolo (a) e cortada (b).....	28
Figura 10 - Fluxograma dos ensaios.....	31
Figura 11 - Argamassadeira com duas velocidades (a) e argamassadeira adaptada (b)	33
Figura 12 - Materiais pesados e separados	34
Figura 13 - Expansão volumétrica dos corpos de prova.....	37
Figura 14 - Testes de superplastificante, fibras e água com: RBMG, Sílica, cimento, água....	37
Figura 15 - Análise da formação de espuma em superplastificantes, sem fibras (a) e com fibras (b)	38
Figura 16 - Liberação do ar incorporado no UHPCR (a) e corpo de prova com comportamento esperado (b).	39
Figura 17 - Ensaio de abatimento	41
Figura 18 - Molde para corpos de prova prismáticos e corpos de prova cilíndricos	41
Figura 19 - Prensa de Amsler e ensaio de compressão corpo de prova prismático	42
Figura 20 - Prensa Shimadzu e ensaio de tração na flexão	43
Figura 21 – Exemplo de dados do ensaio de tração na flexão.....	44
Figura 22 - Dados separados por categoria	44
Figura 23 - Dados tratados	45
Figura 24 - Dados com deslocamentos reais e deslocamento máximo destacado em vermelho	46
Figura 25 - Inserção dos dados no software Origin.....	47
Figura 26 - Gráfico gerado pelo Origin	48
Figura 27 - Caixa de ferramentas para cálculo da tenacidade	49
Figura 28 - Valor em N.mm obtido para o exemplo	49
Figura 29 - Volume gerado para futuras moldagens	51
Figura 30 - Resistência à compressão média obtida.....	53

Figura 31 - Resistência à tração na flexão média obtida	54
Figura 32 - Tenacidade total aos 28 dias	55
Figura 33 – Tenacidade total aos 56 dias.....	56
Figura 34 - Tenacidade total aos 91 dias	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sumário de fibras usadas no UHPC	25
Tabela 2 - Principais características de fibras sintéticas.....	27
Tabela 3 - Caracterização da Fibra HMPE	28
Tabela 4 - Dosagem do UHPCR.....	32
Tabela 5 - Método de mistura do UHPCR.....	34
Tabela 6 - Incorporação de fibras HMPE no UHPC	36
Tabela 7 - Método de mistura UHPCFRH.....	39
Tabela 8 - Resultados do espalhamento.....	52
Tabela 9 - Resistência à compressão média obtida.....	52
Tabela 10 - Resistência à tração na flexão média obtida	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Considerações iniciais	13
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos.....	13
1.3 Justificativa.....	14
2 Revisão bibliográfica	16
2.1 Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC)	16
2.1.1 Definição	16
2.1.2 Histórico.....	16
2.1.3 Principais Características e Aplicações.....	17
2.1.4 Materiais de Composição.....	19
2.2 Fibras	21
2.3 Método de Produção e Dosagem.....	29
3 Metodologia	31
3.1 Considerações Iniciais	31
3.2 Procedimento adotado	31
3.3 Etapa 1: Apresentação e Dosagem do UHPCR.....	32
3.4 Etapa 2: Produção e moldagem do UHPCR.....	33
3.5 Etapa 3: Seleção e preparo da fibra de HMPE	35
3.6 Etapa 4: Desenvolvimento do método de inserção das fibras de HMPE no UHPC	35
3.7 Etapa 5: Produção e moldagem do UHPCFRH.....	39
3.8 Etapa 6: Ensaios no estado fresco e endurecido	40
4 RESULTADOS	51
4.1 HMPE.....	51
4.2 Espalhamento	51
4.3 Resistência à compressão	52
4.4 Resistência à tração na flexão	53
4.5 Tenacidade.....	54
5 CONCLUSÃO.....	58

Referências	59
Anexo A – Study to obtain UHPC with addition of silica and MGW	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O concreto é um dos materiais mais utilizado no mundo, perdendo apenas para a água (LOPES; PEÇANHA; CASTRO, 2020). Sendo assim, constantemente novas demandas oriundas da construção civil são solicitadas ao profissional de engenharia, que busca conhecimento na literatura técnica e científica, com o foco em obter respostas adequadas e economicamente viáveis para suprir essas necessidades.

O concreto convencional possui como propriedades principais a boa resistência à compressão, baixa resistência a tração e baixa ductilidade. Visando aprimorar as características do concreto convencional, e devido ao surgimento de aditivos redutores de água e de adições minerais, tornou-se viável a obtenção dos concretos de alto desempenho (CAD). Os CADs apresentam propriedades aprimoradas de resistência mantendo a e trabalhabilidade, mesmo com baixa relação de água/cimento (CHRIST; TUTIAKIAN; HELENE, 2022).

Dentro desse contexto, o concreto de ultra alto desempenho (ultra-high performance concrete - UHPC) apresenta elevada resistência à compressão, devido ao seu empacotamento granular, presença apenas de finos com diferentes curvas granulométricas, resultando em redução de vazios da mistura.

A adição de fibras é crucial para a tenacidade do UHPC, promovendo maior ductilidade para o material e podendo apresentar aumento da resistência à flexão sem prejudicar sua matriz cimentícia ou melhora da coesão da mistura com a aplicação de fibras de polipropileno (CHRIST et al., 2019).

Assim, esse estudo deseja obter um efeito sinérgico das propriedades do UHPC com adição de fibras, analisando as alterações provocadas dessa incorporação durante o processo de mistura e analisando os benefícios mecânicos dessa composição.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo obter do concreto de ultra alto desempenho com adição randômica de fibras de polietileno de alto módulo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Levantar informações bibliográficas sobre a fibra de HMPE e seus benefícios;
- Desenvolver metodologia de preparo e corte das fibras HMPE no UHPC;
- Definir procedimento de inserção e mistura do UHPC com adição de HMPE;

- Avaliar interação da fibra com o UHPC, referente ao espalhamento no estado fresco. No estado endurecido, estudar a resistência à compressão, à tração na flexão e os efeitos na tenacidade.

1.3 Justificativa

O UHPC é um material de elevada resistência e alta durabilidade, e está sendo cada vez mais aplicado em obras de engenharia em todo o mundo. Uma de suas principais vantagens diz quanto a capacidade de ser mais durável que o concreto convencional em diversas aplicações (SCHMIDT; FEHLING, 2005).

Para que isso seja possível, o UHPC conta com vários componentes essenciais em sua composição, sendo a sílica ativa uma adição usual. Por ser composta por pozolana de alta superfície específica e alto teor de óxido de silício (SiO_2), ela é responsável por potencializar a hidratação do concreto e garantir maior resistência do composto (CHRIST; TUTIAKIAN; HELENE, 2022). Essa adição também melhora o empacotamento granular do UHPC, pois com partículas de dimensões inferiores às do cimento, garante que mais espaços sejam preenchidos dentro da matriz cimentícia reduzindo o número de vazios. Esses benefícios só são possíveis na presença de água. Como o UHPC demanda um baixo teor a/c, faz-se necessário aditivos superplastificantes, visando melhorar a trabalhabilidade de um compósito composto de tantos materiais finos.

Já os Resíduos de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG) são usados como fillers inertes que tem a função de reduzir o consumo de cimento e diversificar mais a granulometria da mistura, contribuindo mais para o empacotamento das partículas (ALMADA; SANTOS; SOUZA, 2022).

A adição de fibras no UHPC está diretamente ligada com a sua fragilidade, e sua baixa resistência a tração. As fibras de polietileno de alto módulo (HMPE) são uma alternativa viável, pois garantem aumento de tenacidade e tornando o compósito pseudo-dúctil (SILVA NETO, 2018). As fibras de HMPE apresentam-se em multifilamentos e possuem características interessantes, tais como: alta resistência, baixa densidade, baixo alongamento na ruptura e resistência à maioria dos produtos químicos, como a ácidos, álcalis e à água (DSM, 2008). Logo, quando comparada com fibras de aço, apresentam melhora significativas, como a redução peso próprio da mistura.

Portanto, nesse trabalho buscou-se estudar os efeitos de adição randômica de fibras de HMPE no concreto UHPC de referência, visando contribuir para melhor entendimento do

processo de incorporação desse material na mistura, atendendo as características mínimas do UHPC e aprimorando as características quanto a resistência à tração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC)

2.1.1 Definição

Um dos grandes avanços tecnológicos da construção civil é o uso do UHPC (*ultra-high-performance concrete* – UHPC), que garante propriedades de resistência e durabilidade superiores quando comparados a misturas cimentícias convencionais (PERRY, 2018). No geral, segundo Perry (2018), o UHPC é constituído por uma matriz granulométrica heterogênea composta de areia fina, com diâmetro inferior a 400µm, sílica, cimento Portland, dentre outros filers. O autor ainda afirma que o UHPC apresenta elevada resistência à compressão, e durabilidade aprimorada devido sua matriz cimentícia extremamente compacta. Nos UHPCs é usual a adição de fibras de aço, fibras de PVA (fibra sintética de álcool polivinílico), vidro entre outras, e podendo gerar o aumento da ductilidade da mistura. Por fim, são características fundamentais do UHPC: possuir resistência à compressão superior a 120 MPa, resistência a tração superior a 6 MPa e espalhamento de no mínimo 270 mm, com a idade de 28 dias.

Entretanto, há várias normas e diretrizes de diferentes países que estabelecem os valores de resistência do UHPC, no Estados Unidos a ASTM, Suíça, Espanha e Canadá determinam 120 MPa, já nos Estados Unidos a ACI (Instituto Americano de Concreto), Coreia do Sul, Japão apresentam 150 MPa, e França, e Alemanha estipulam 130 MPa (PERRY, 2018), o Brasil não possui uma norma exata, mas segue na linha dos 120MPa. Assim as características principais do UHPC estão relacionadas principalmente com alta densidade, elevada resistência a compressão e boa ductilidade.

Portanto o UHPC possui propriedades que o tornam altamente adaptável e vem passando por estudos e aprimorações, que serão abordados no tópico a seguir, levando em consideração como surgiu sua alta resistência devido ao baixo teor água/aglomerante, presença de superplastificante e empacotamento granular.

2.1.2 Histórico

Concretos de elevada resistência à compressão foram desenvolvidos somente a partir dos anos 50 e, apenas em 1966 atingiu-se 140 MPa de resistência à compressão (CHRIST; TUTIAKIAN; HELENE, 2022). Porém as misturas da época contavam com um consumo elevado de cimento e se fazia necessário uma redução para se tornar mais viável.

Portanto, ainda nos anos 60, a resistência à compressão dos concretos estava limitada a esse consumo, assim era padrão resistências de apenas 40 a 60 MPa com os aditivos redutores de água da época (AZMEE; SHAFIQ, 2018). Sendo apenas possível, nesse período, realizar

misturas com até 510 MPa em laboratórios com curas térmicas e misturas a vácuo, porém com alto consumo energético.

Apenas nos anos 80, com a utilização de superplastificante mais eficientes, foi possível utilizar valores de água/cimento (a/c) na magnitude de 0.30 e reduzir ainda mais efetivamente os valores a/c até o valor baixíssimo de 0.16 (BACHE, 1981). Com esses novos aditivos era possível uma melhor trabalhabilidade na mistura, com melhor fluidez e assim menores consumos de cimento.

Nos anos 90 foi desenvolvido o RPC (*Reactive Power Concrete* – CPR), o concreto pós reativo era basicamente a ideia do que viria se tornar o UHPC, ou seja, o primeiro passo significativo para o que se tem hoje (CHRIST; TUTIAKIAN; HELENE, 2022). Além disso, em 1994 aconteceu o aprimoramento do empacotamento de partículas para obtenção do UHPC, otimizando ainda mais a viabilidade do material (DE LARRARD; SEDRAN, 1994a). Em 1997 a Ductal® começou a comercialização do RPC, com valores de resistência à compressão entre 200 e 800 MPa e boa trabalhabilidade (AZMEE; SHAFIQ, 2018).

Visto todo esse desenvolvimento ao longo dos anos, no próximo tópico serão abordadas as principais propriedades e as obras de UHPC no cenário mundial e nacional, dando ênfase para as primeiras construções.

2.1.3 Principais Características e Aplicações

Como discutido, o UHPC possui resistência média de 120 MPa, baixo fator a/c, elevados índices de superplastificantes e presença de uma matriz cimentícia densa, como estudado por LI et al. (2020). Essas propriedades garantem resistência elevada a penetração de água e íons cloreto, ou seja, o UHPC é mais resistente a ambientes mais agressivos, como regiões próximas ao mar.

O UHPC vem sendo testado há 30 anos, e sua confiabilidade já foi comprovada de diversas formas. Em 1994 os primeiros testes tiveram início nos Estados unidos, corpos de provas foram expostos e monitorados ao ambiente marítimo e após 20 anos ainda apresentaram boas condições (PERRY, 2018).

Devido a essas características, umas das primeiras obras que optou pelo uso UHPC foi a Ponte Sherbrooke, de 1997, no Canadá, visto que esta está sobre um rio. O vão da ponte é de 60 metros e é composta por painéis pré-moldados de UHPC. No Japão, surgiu em 1999 as primeiras construções com UHPC, com o uso de painéis pré-fabricados utilizado em passarelas para pedestres e revestimento de túneis. Durante esse período países como Austrália, Coreia do Sul, Espanha, China, Suíça, Alemanha e Malásia também deram início as suas construções,

todos com características semelhantes: próximo a ambientes marítimos, com a aplicação de materiais pré-moldados em vigas, pontes, fachadas ou passarelas (PERRY, 2018).

Akhnoukh et al. (2021) aponta que, nos Estados Unidos, o UHPC é majoritariamente usado em projetos de pontes. Aproximadamente 200 dessas obras de arte especial já possuem a presença desse material, além disso, reparos pontuais com UHPC nessas obras de arte são bastante comuns.

Finalmente, no Brasil, as aplicações desse concreto foram tardias, surgindo apenas em 2016. Foi utilizada a tecnologia Ductal® com painéis de UHPC (MULLER; KOELLE; ALMEIDA, 2017) para a obra da fachada do ministério das relações exteriores. A escolha pelo UHPC se deu pela necessidade de execução da fachada com painéis mais leves, pois nessa ocasião se tratava de uma reforma do prédio.

Com aproximadamente 90 m² de área, 9 metros de altura e 10 metros de comprimento, os painéis vazados são compostos de 8 placas de 4,5 metros de altura por 2,5 metros de comprimento, tendo aproximadamente 3 centímetros de espessura cada um. Com isso, houve redução do peso da fachada em quase um terço, equivalentes a 7 toneladas, comparado com a proposta com concreto convencional., conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Fachada do Ministério das Relações Exteriores, São Paulo



Fonte: MULLER; KOELLE; ALMEIDA, 2017

No Brasil houve outras aplicações em fachadas. Empresas como a Pallazo Revestimentos executam obras com cobogós e brises de fachada (CHRIST; TUTIAKIAN; HELENE, 2022). A empresa Biobox Sustainable, por sua vez elabora paredes com UHPC,

empreendimento que gerou a criação da New House. O empreendimento usa o método criado por Christ (2019), o Método de Dosagem UNISINOS. Essas habitações contam com um sistema de estruturas metálicas com painéis de UHPC com espessuras de 1 centímetro, proporcionando boa durabilidade, resistência e conforto termoacústico, conforme Figura 2.

Figura 2 - Habitação construída utilizando placas de UHPC



Fonte: Christ (2019)

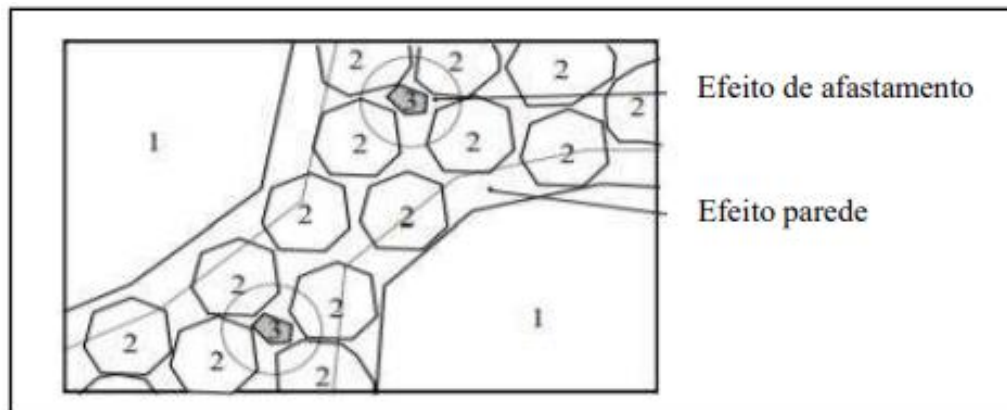
Portanto, como apresentado, o UHPC tem viabilidade econômica e vantagens sobre concretos convencionais em diversas situações, características essas que têm ligação fundamental com a qualidade dos materiais e seu empacotamento ideal. No tópico a seguir, sobre materiais, será descrito a importância de cada elemento usado no UHPC e suas particularidades.

2.1.4 Materiais de Composição

Segundo Christ, Tutiakian e Helene (2022), para a obtenção de uma mistura com as propriedades do UHPC, é necessário que os materiais apresentem empacotamento granular ideal, ou seja, menores vazios possíveis e não podem possuir matéria orgânica em sua composição.

O empacotamento contínuo promove a menores impactos no efeito de afastamento (*loosening effect*) e efeito parede (*wall effect*). O efeito parede não ocorre no UHPC, pois este não possui agregado graúdo. Este efeito promove a perturbação desses agregados de maior dimensão. O efeito afastamento, por sua vez, acarreta na separação de grãos de mesma dimensão (DE LARRARD; SEDRAN, 2002), como observado na Figura 3.

Figura 3 - Efeito parede e afastamento



Fonte: Adaptado de De Larrard e Sedran (2002)

Segundo os autores o efeito de afastamento acontece quando o grão (3) tem menor dimensão que os vazios deixados pela configuração dos grãos maiores (2), que compromete a densidade e empacotamento das partículas. Pela Figura 3, ainda é possível ver que quando há presença de grãos com elevado diâmetro (1) gera-se uma superfície em que se estabelece mais vazios no entorno das partículas menores (2). Portanto, é necessária uma pesquisa adequada para determinar quais adições minerais e aglomerantes serão usados na mistura de acordo com suas curvas granulométricas.

Christ, Tutiakian e Helene (2022) afirmam que é possível usar qualquer tipo de cimento comercializado e licenciados no mercado local, contudo aqueles com maiores adições e maiores resistências tendem a promover um concreto de mais desempenho, um bom exemplo é o CPV ARI.

Sabendo disso, um dos desafios a se vencer é a quantidade de cimento consumido para a preparação da mistura, portanto são utilizados filers para tornar mais financeiramente viável a fabricação do UHPC. A baixa relação água/aglomerante, normalmente inferior a 0.23, pode acarretar a hidratação incompleta do cimento e assim consumos elevados do aglomerante, então há a necessidade adições minerais (CHRIST; TUTIAKIAN; HELENE, 2022).

Uma dessas adições usuais é a sílica ativa. Entretanto, ela não atua apenas como filer. Devido a sua composição com grandes concentrações de dióxido de silício (SiO_2), a sílica reage com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , presente na hidratação do concreto, responsável pela produção de silicatos de cálcio hidratados secundários (C-S-H), que por fim, geram reações de hidratação do cimento, então elevando as resistências da mistura (CHRIST; TUTIAKIAN; HELENE, 2022).

Para garantir a plena funcionalidade da mistura a hidratação em baixos teores de a/c é fundamental a utilização de aditivos químicos, os superplastificantes. A NBR 11768-1 (2019) divide os aditivos redutores de água tipo 1 e 2, sendo o tipo 2, superplastificantes, usado em UHPC, pois eles alteram aspectos do estado endurecido e fresco do concreto fundamentais na trabalhabilidade da mistura.

Para viabilizar ainda mais a produção de concretos de ultra alto desempenho pode ser feita a inserção de Resíduos de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG). O RBMG é um material inerte e possui a função de filler na mistura. Sua utilização gera economia por meio da redução do consumo de cimento e diversificando a granulometria por reduzir a quantidade de poros na mistura, além de garantir uma destinação mais apropriada para esse resíduo (ALMADA; SANTOS; SOUZA, 2022).

Com consumo eficiente de cimento e elevadas resistências, é interessante adição de fibras no UHPC, pois este, como qualquer outro concreto, sofre com baixa resistência a tração e baixa ductilidade. O tópico a seguir comenta como fibras conseguem melhorar essas propriedades.

2.2 Fibras

Há mais de 60 anos são elaboradas pesquisas referentes a associação de compósitos cimentícios e fibras, essa interação resulta nos concretos reforçados com fibras (CRF). A primeira pesquisa, de 1960, dava indícios do uso de fibras para combater a fragilidade e, consequentemente, melhorar comportamento mediante à fissuração de misturas a base de cimento Portland. Essa incorporação de fibras causou grandes impactos, tanto na área acadêmica quanto na comercial (ZOLLO, 1997).

Segundo Zollo (1997), a adição inicial de fibras espaçadas de forma muito aproximada tinha a proposta de aprimorar as resistências dos compósitos que apresentavam características frágeis. Na época já havia evidências que o espaçamento das fibras era fator crucial para o sucesso da combinação entre argamassa e fibra.

Os estudos iniciais do tema apresentavam uma dificuldade considerável com o tipo de fibra disponível naquela época, nesse momento eram utilizadas fibras advindas de fábricas automobilísticas e da indústria têxtil, portanto era complicado ter controle sobre os experimentos e as fibras costumavam ser mais grosseiras quando comparadas a estudos futuros. Entretanto, quando era possível o desenvolvimento da mistura dos compósitos com as fibras, ficava evidente que era promissor essa integração.

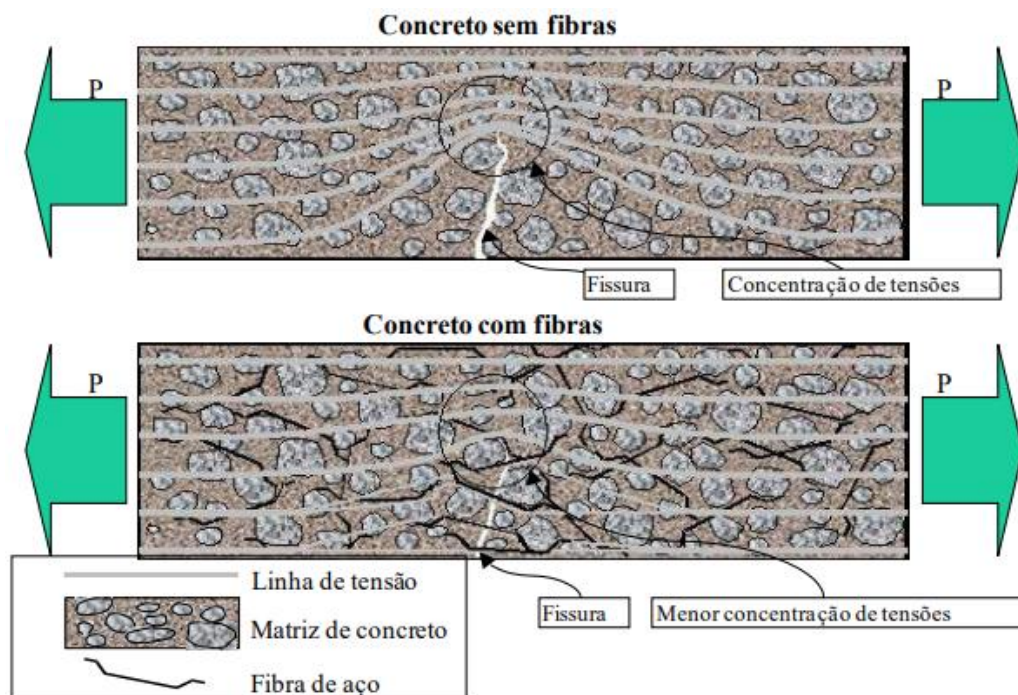
O autor afirma que somente por volta de 1980, com o surgimento de diferentes tipos de fibras, tais como: aço e polipropileno, os CRF mostraram ainda mais seu potencial, tornando-se possível sua obtenção de maneira mais eficiente e com melhores resistência à flexão, melhor controle de fissuras e mantendo a característica da elevada resistência a compressão.

Nesse contexto, Figueiredo (2005) explica que a presença de fibras atua onde o concreto tem maior deficiência: o baixo desempenho em evitar que fissuras se espalhem quando submetido, principalmente, aos esforços de tração. A ruína de peças de concreto convencional acontece quando há a junção de várias fissuras originadas pelos esforços, isso promove uma redução da área resistente e, portanto, gerando ainda mais concentração de tensões até que haja falha do material.

Sabendo que a união de fissuras, e não necessariamente sua quantidade, é a principal causa da fragilidade do concreto, Figueiredo (2005) afirma que a adição fibras de aço no concreto garante que haja uma transferência de tensões e evitam suas concentrações nas extremidades das fissuras, assim o material passa a ter um comportamento pseudo-dúctil, não mais frágil como os concretos convencionais.

Na Figura 4 é possível observar que o concreto com fibras com módulo de elasticidade, resistência e volume devidamente apropriada apresenta um desempenho melhor, justamente na redução da velocidade da união das fissuras e gerar menor concentração de tensões.

Figura 4 - Mudança das concentrações de tensões com o reforço de fibras



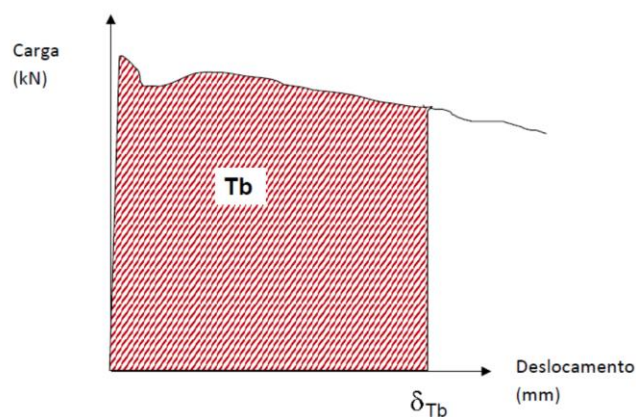
Fonte: Figueiredo (2005)

A partir do momento em que o material demonstra um nível de ductilidade, torna-se possível a análise de sua tenacidade que, segundo Maciel (2017), é a capacidade dele dissipar energia e, portanto, deformar-se até a falha.

Analisar a tenacidade é fundamental visto que esse parâmetro reflete a capacidade do material de absorver energia e resistir à propagação de fissuras antes da ruptura. Em concretos tradicionais, a fragilidade é uma característica comum, ou seja, eles tendem a falhar de forma súbita quando submetidos a tensões além de seu limite elástico. O reforço com fibras modifica esse comportamento.

É possível determinar a tenacidade de um compósito a partir do gráfico de carga x deslocamento, onde a área da curva apresenta quanto aquele material absorveu de energia, levando em conta a carga no momento prévio e seguido de fissuração (MACIEL, 2017). Esse método pode ser visto na Figura 5 a seguir.

Figura 5 - Critério da JSCE SF-4 (1984) para determinação da tenacidade



Fonte: Maciel (2017)

O UHPC é considerado um material frágil e por isso é de grande interesse a adição de fibras. Com a incorporação de fibras em sua mistura é possível obter melhor tenacidade e ductilidade, assim evitando rupturas bruscas e menor separação do concreto pós ruína (BALESTRA; OZELAME; SAVARIS, 2020).

Para garantir os benefícios desse material, é necessário que as fibras possuam características coerentes referentes a: teor incorporado, diâmetro e comprimento, orientação na mistura e material que a fibra é composta (CHRIST; TUTIAKIAN; HELENE, 2022). Além disso, o material escolhido deve possuir módulo de elasticidade superior ao concreto, pois só assim terá alongamento suficiente para o controle da abertura de fissuras, atendendo a esses critérios, dependendo da fibra, é possível ter vantagens distintas para o UHPC.

Como observado, o reforço com fibras, com tamanho e volume adequado, pode propiciar aumento da resistência à tração, mesmo quando fissurado, e a fim de garantir essas propriedades, são utilizadas fibras de diferentes materiais que podem compor o UHPC, podendo ser de aço, carbono, vidro, sintéticas e diversos outros tipos, algumas dessas podem ser observadas na Figura 6.

Figura 6 - Diferentes tipos de fibras



Fonte: Cimento Itambe, (2010)

É possível observar as propriedades de diferentes tipos de fibras utilizadas no UHPC na Tabela 1. É importante se atentar com as propriedades da fibra na hora do uso desse concreto. Por exemplo as fibras de HMPE e Polipropileno (PP) possuem elevadas resistência a tração, apenas inferior ao da fibra de carbono, que apresenta um valor extremamente elevado quando comparado com as demais. Porém, assim como a fibra de aço possui uma densidade muito elevada. Portanto, quando o objetivo é um concreto com bom desempenho de tração e reduzido peso próprio, PP e HMPE podem ser um material interessante para atingir melhores resultados, tendo em vista sua baixa densidade. Em seguida serão discutidos os tipos de fibras usuais e suas propriedades.

Tabela 1 - Sumário de fibras usadas no UHPC

Fibra	Fibra de aço	Fibra de Carbono	Fibra de Vidro	HMPE	PP
Tamanho (mm)	13	0,05-0,2	13	15	13
Diâmetro (μm)	200	0.1	18	Varia	22
Densidade (kg/m^3)	7800	2000	2600	950	910
Resistência à Tração (MPa)	1000-3000	30000	2000	3000- 3900	3250
Módulo de Elasticidade (GPa)	203	240	52-87	109- 132	3,7

Fonte: Adaptado de Du et al. (2021)

- Fibras de aço

As fibras de aço são comumente escolhidas devido a sua alta capacidade de elevar a resistência do concreto à flexão, incrementos de 2% no compósito pode gerar aumentos na resistência flexão (MENG; KHAYAT, 2018). Na Figura 7, é possível observar como são preparadas as fibras de aço, com 13mm de largura e 0,2mm de diâmetro.

Figura 7 - Fibras de aço preparadas



Fonte: Christ et al. (2019)

Contudo, fibras de aço tem alto preço inicial e podem ter efeitos corrosivos, observado na Figura 8. Por isso, há outras possibilidades para desenvolver um concreto que possua

diferentes características, com adição de fibras sintéticas por exemplo, e manter o almejado: melhor resistência a tração e certa ductilidade, adaptado ao meio inserido.

Figura 8 - Fibra de aço corroída na fissura do concreto



Fonte: Afroughsabet, Biolzi e Ozbakkaloglu (2016)

- Fibras sintéticas

As fibras sintéticas são uma ótima solução para o reforço de concretos, elas são divididas entre poliméricas e de base mineral. Para o uso na construção civil são comumente utilizadas devido ao custo benefício relacionado com as propriedades que estas garantem quando misturadas a materiais cimentício (AHMAD; ZHOU, 2022). São comumente utilizadas: Polipropileno (PP), Polietileno (PE), Acrílica, Nylon, Polyester, Aramida e é de extrema importância levar em consideração as características de cada uma dessa na hora de sua aplicabilidade.

Segundo Ahmad e Zhou (2022), a Tabela 2, apresenta algumas das principais propriedades das fibras sintéticas. É possível notar como cada fibra uma delas possui características próprias e podem variar significativamente, para que se obtenha o resultado esperado no momento da produção de compósitos. É preciso analisar bem qual a finalidade que se almeja e empregar a fibra correspondente.

Tabela 2 - Principais características de fibras sintéticas

Tipo de Fibra	Acrílica	Aramida	Nylon	Polyester	PE	PP
Massa específica (g/cm³)	1,17	1,44	1,16	1,34–1,39	0,96	0,90–0,91
Resistência a Tração (MPa)	207–1000	3620	965	896–1100	200–300	310–760
Módulo de elasticidade (GPa)	14,6–19,6	62	5,17	17,5	5	3,5–4,9
Alongamento até a ruptura (%)	7,5–50,0	4,40	20,0	20,0	3,0	15,0

Fonte: Adaptado de Ahmad e Zhou (2022)

Quanto as fibras sintéticas de polietileno de alto módulo (HMPE), estas são comumente utilizadas em cordas na indústria naval, para a construção civil, ela apresenta uma tenacidade superior as fibras comumente usadas em concreto, extremamente superior a fibras de aço e supera ainda as de aramida carbono e nylon, estas possuem módulo de elasticidade semelhante a fibra de HMPE (DSM, 2008). Possuir elevada tenacidade significa absorver melhor a energia e, portanto, promover ainda um desempenho ainda melhor na ductilidade, ou seja, uma

propriedade bastante interessante para compósitos cimentícios, como citado anteriormente. As propriedades da fibra de HMPE podem ser observados na Tabela 3.

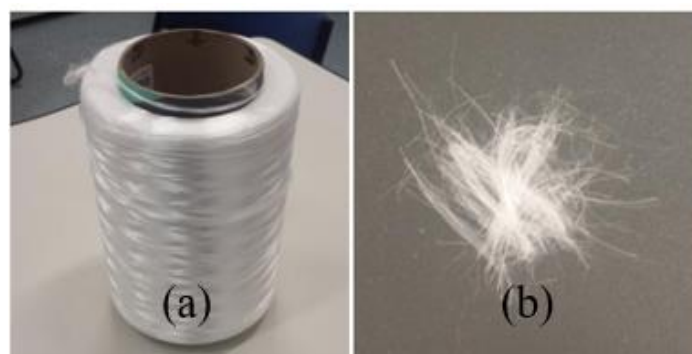
Tabela 3 - Caracterização da Fibra HMPE

Propriedade	Unidade	Valor
Massa Específica	g/cm ³	0,98
Ponto de fusão	°C	145
Temperatura Crítica	°C	65
Absorção de água	%	<1
Densidade linear	dTex	1760
	N/Tex	3,4 - 4,0
Resistência a Tração	g/den	38 - 45
	GPa	3,3 - 3,9
	kgf/DE	30
Tenacidade	N/Tex	2,5
	N/tex	116
Módulo de elasticidade	g/den	1267 - 1552
	GPa	109 - 132
Alongamento até a ruptura	%	3,5

Fonte: Adaptado de DSM (2008)

A fibras de HMPE, como pode ser observado na Figura 9, é composta por uma estrutura de múltiplos filamentos. Nesse sentido, Christ, Tutiakian e Helene (2022) afirmam que esse tipo de fibra apresenta uma desagregação e, portanto, podem afetar negativamente a trabalhabilidade da mistura, porém apresentar melhorar diferentes propriedades mecânicas do UHPC. Para atenuar os prejuízos à trabalhabilidade é importante atentar-se ao processo de separação, inserção e mistura das fibras na matriz.

Figura 9 - Fibra HMPE em rolo (a) e cortada (b)



Fonte: Autoria própria (2024)

Entretanto, o autor também aponta que um dos principais benefícios da incorporação desse tipo de fibra é o incremento no módulo de elasticidade do compósito quando comparado com as fibras de polietileno comuns. O autor ainda determina que a fibra HMPE garante mais ductilidade e tenacidade, quando comparado com o concreto convencional. A partir dos materiais e fibras discutidos anteriormente, será abordado a seguir os métodos de produção e dosagem do UHPC.

2.3 Método de Produção e Dosagem

A dosagem de concretos visa a obtenção de uma mistura eficiente com proporções que garantam a satisfação das propriedades desejadas em sua aplicação. Com o UHPC não é diferente, pois possui características próprias, como a ausência agregados graúdos em sua mistura e, portanto, há possibilidade de ter uma mistura mais otimizada sem que haja elevado consumo de aglomerantes (CHRIST; TUTIKIAN; HELENE, 2022). Esses materiais precisam ser escolhidos de acordo com a facilidade de aquisição local e precisam passar por uma avaliação de suas granulometrias para garantir o empacotamento ideal do UHPC.

De acordo com De Larrard e Sedran (1994), o empacotamento elevado é parte fundamental para obtenção de um UHPC de alta qualidade. Na literatura, há diversas formas empíricas para determinação dos menores vazios possíveis na mistura.

No Brasil, por sua vez, foi desenvolvido o Método de Dosagem UNISINOS para UHPC de Christ, Tutikian e Helene (2022). Esse método busca uma mistura sem a limitação da origem dos materiais escolhidos, tendo como objetivo um baixo índice de vazios e maior empacotamento das partículas. O método propõe que os componentes secos sejam misturados, com o devido cuidado para que não haja perdas. Para isso misturadores planetários com controle de velocidade são mais adequados, pois podem gerar melhor dispersão da mistura, reduzindo do consumo de aditivo superplastificante, melhorando sua trabalhabilidade.

Ainda segundo os autores, propõe-se que com o material seco misturado em baixa velocidade, insira-se 80% da água de maneira que possa cobrir a maior área possível da mistura. Após isso é adicionado o superplastificante, também da forma mais homogênea possível. Em seguida, adiciona-se o restante da água e é misturado em alta velocidade. Por fim, com a fluidez almejada, adiciona-se as fibras com cuidado para que não haja formação emaranhados que possam gerar perdas das propriedades mecânicas do concreto (CHRIST; TUTIAKIAN; HELENE, 2022).

Portanto, este trabalho propôs estudar como seria a implementação de fibras HMPE para dosagem e produção no UHPCR. No próximo capítulo, É abordado como foram os métodos para obtenção desses resultados.

3 METODOLOGIA

3.1 Considerações Iniciais

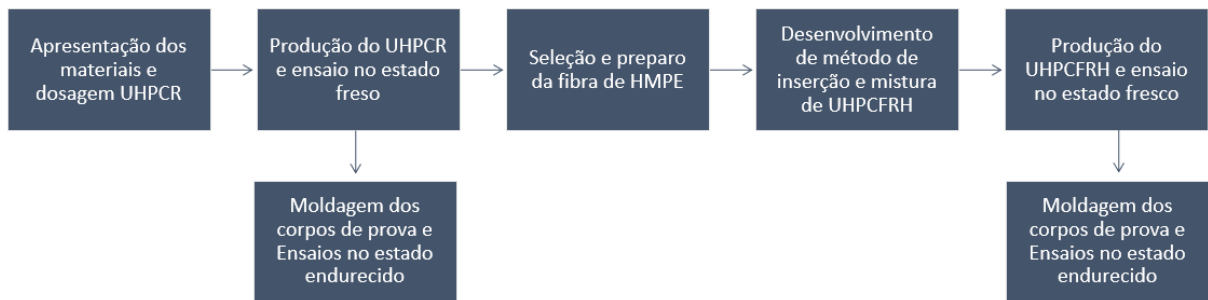
Como parte preliminar ao método experimental, foi realizado um estudo do estado da arte, utilizando livros, teses, artigos científicos e normas com o objetivo de realizar uma busca de qualidade com o objetivo de realizar uma busca de qualidade para atendimento para o estudo proposto.

A caracterização dos materiais e dosagem do UHPC de referência (UHPCR), sem fibras, foi determinado em estudo prévio, com o título “Estudo de dosagem de UHPC com uso de sílica e RBMG” (MACIEL et al., 2024), que segue no anexo A, no fim desse trabalho. Uma vez em posse do UHPCR, o mesmo foi reproduzido e introduzida as fibras, para isto, a seguinte metodologia foi adotada, apresentada abaixo.

Em posse dos materiais, deu-se início a produção de mistura e moldagens do UHPCR. Toda a parte experimental foi desenvolvido no Laboratório de Materiais e Estruturas - LEMA, do centro de tecnologia – CTEC, na Universidade Federal de Alagoas – UFAL. A Figura 10 apresenta a sequência adotada para o trabalho.

3.2 Procedimento adotado:

Figura 10 - Fluxograma dos ensaios



Fonte: Autoria própria (2024)

O trabalho de conclusão de curso foi dividido nas etapas a seguir:

- Etapa 1: Apresentação e dosagem do UHPC de referência, obtido pelo estudo prévio, mencionado anteriormente;
- Etapa 2: Produção e moldagens dos corpos de prova para o UHPCR e ensaio de espalhamento, no estado fresco para comprovação de sua propriedade;
- Etapa 3: Seleção e preparo da fibra de HMPE, foi analisada as propriedades fornecidas pelo fabricante e, em seguida, foi desenvolvido um método de corte;

- Etapa 4: Desenvolvimento de um método de inserção e mistura das fibras de HMPE no UHPCR e análise do estado fresco dos corpos de prova moldados;
- Etapa 5: Produção e moldagens dos corpos de prova do UHPCFR com adição randômica de fibras de HMPE;
- Etapa 6: Realização dos ensaios no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e tenacidade) do UHPCR e UHPCFR.

3.3 Etapa 1: Apresentação e Dosagem do UHPCR

Os materiais utilizados para o UHPCR foram: areia obtida em depósito de materiais, peneirada na peneira 600 μ m, no caso do RBMG, que foi adquirido mediante doação de empresa da região, observou-se que o tamanho dos grãos varia de 3,39 μ m a 69 μ m. O cimento usado foi o CP-V – ARIMAX de fácil aquisição na região e o diâmetro das partículas variaram entre 0,2 μ m a 60 μ m. Já a sílica, é proveniente da fabricação do ferro silício, com uma faixa entre 28,36 μ m a 305,87 μ m. O superplastificante foi a base de éter policarboxilato (sp). A caracterização de cada material pode ser encontrada na pesquisa de iniciação mencionada anteriormente (MACIEL et al., 2024).

A dosagem do UHPC de referência consiste na adição por adição, pois reduz a relação a/agl final da mistura, A sílica foi adicionada em relação ao cimento, o RBMG à areia e o superplastificante aos ligantes (cimento + sílica). A dosagem final foi de 50% de RBMG, 20% de sílica ativa, 1,5% de superplastificante (sp) e relação água/aglomerante (a/agl) de 0,25. A dosagem foi apresentada na Tabela 4:

Tabela 4 - Dosagem do UHPCR					
Cimento (kg/m ³)	Sílica (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	RBMG (kg/m ³)	sp (%)	a/agl
571,79	114,36	686,14	343,07	1,50	0,25

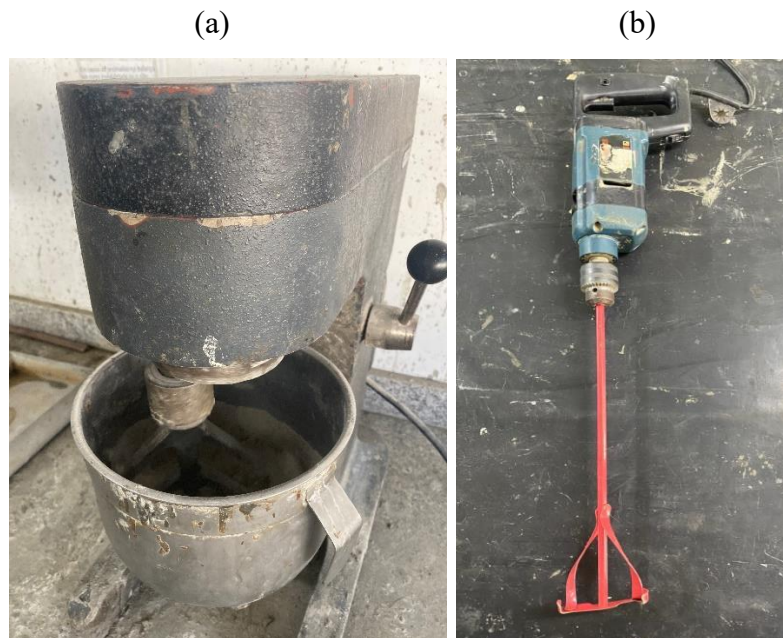
Fonte: Autoria própria (2024)

Em seguida, foi iniciado o processo de moldagem dos corpos de prova do UHPCR, apresentado no tópico a seguir.

3.4 Etapa 2: Produção e moldagem do UHPCR

Para parte do processo de mistura, foram utilizadas duas argamassadeiras, uma com velocidades de 60rpm e 135rpm, e a outra de alta velocidade de 1000rpm, adaptada com a combinação de furadeira com haste para mistura de tinta. Ambas podem ser observadas na Figura 11. O uso da argamassadeira adaptada foi de extrema importância para fase inicial da mistura, apenas com esta foi possível que a mistura alcance a homogeneidade desejada.

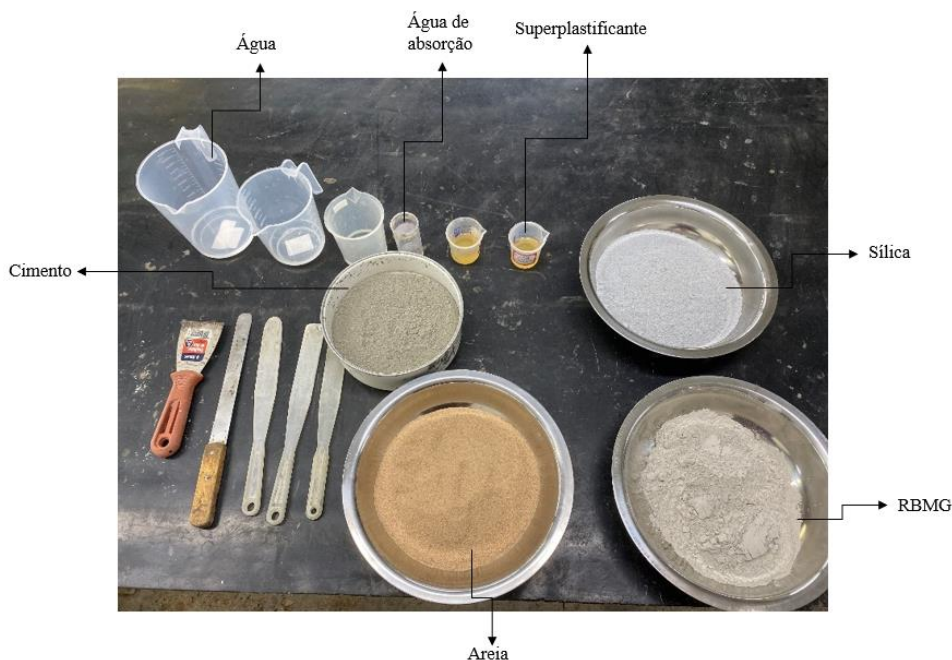
Figura 11 - Argamassadeira com duas velocidades (a) e argamassadeira adaptada (b)



Fonte: Autoria própria (2024)

Primeiramente, os materiais são pesados e separados, observado na Figura 12, é possível constatar o cimento, sílica, areia e RBMG. Quanto a parte líquida dos materiais de escolha, a água nos dois maiores recipientes, a água de absorção dos agregados no menor recipiente e o superplastificante dividido no recipiente de cor amarela.

Figura 12 - Materiais pesados e separados



Fonte: Autoria própria (2024)

Os aglomerantes, cimento e sílica, são misturados juntos com parte da água durante sessenta segundos com a argamassadeira adaptada, e durante uma pausa de trinta segundos os agregados miúdo, areia e RBMG, são vertidos na outra argamassadeira, então continua-se a mistura dos aglomerantes com adição de mais água e metade superplastificante total da mistura. Após a homogeneização da pasta, os agregados são misturados em 60rpm junto da água de absorção durante noventa segundos. Em seguida, é adicionada a pasta aos agregados em 135rpm durante cento e vinte segundos, outra pausa é feita para adição do restante da água e superplastificante e por fim, a mistura continua a 135rpm até obter a consistência necessária. Todo esse processo dura em média treze minutos e meio e pode ser observado na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Método de mistura do UHPCR

Método	Ação	Tempo(s)	Velocidade
Pasta (Misturador de baixa rotação)	Mistura inicial de 25% da água + ligantes	60	1000rpm
	Pausa para limpeza	30	-
	Mistura dos componentes	60	1000rpm

	Pausa para limpeza e adição de 25% de água + 50% do superplastificante	30	-
	Mistura de todos os componentes da pasta	120	1000rpm
Argamassa (Argamassadeira)	Homogeneização agregados + água de absorção	90	60rpm
	Mistura pasta + agregados	60	135rpm
	Pausa para limpeza e adição de 50% do aditivo e restante da água	30	-
	Mistura dos componentes	210	135rpm
	Pausa para limpeza	30	-
	Mistura dos componentes	120	135rpm

Fonte: Autoria própria (2024)

3.5 Etapa 3: Seleção e preparo da fibra de HMPE

A fibra foi adquirida em rolo e foi necessário o corte no tamanho de 15mm, entretanto a fibra de HMPE é composta de múltiplos filamentos, portanto, foi necessário desenvolver um método de corte eficiente que garantisse um volume de fibra necessário para as moldagens.

A primeira tentativa para desenvolver um método foi a utilização de tesoura comum de papelaria, mas os múltiplos filamentos tornava o corte muito trabalhoso, além de não gerar um corte uniforme entre os pedaços. A solução foi o uso da lâmina de um estilete posicionado a uma bancada com uma fita adesiva. O processo revelou-se eficiente e funcional.

Para a dosagem, foi determinada o quantitativo de 0,10% e 0,15%, em volume, em relação ao volume total da mistura (SILVA NETO, 2018). Para as dosagens com adição, a nomenclatura será a sigla UHPCFRH com as quantidades de adição, em porcentagem. Após as letras “H”, por exemplo, UHPCFRH15 possui 0,15% de HMPE.

3.6 Etapa 4: Desenvolvimento do método de inserção das fibras de HMPE no UHPC

Em posse do UHPC, foi iniciado os procedimentos de inserção das fibras preparadas. Baseado na literatura, o método consiste na incorporação randômica das fibras enquanto a

mistura já se encontra homogênea (SILVA NETO, 2018), com fluidez e em alta velocidade, e pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Incorporação de fibras HMPE no UHPC

Método	Ação	Tempo(s)	Velocidade
Pasta (Misturador de baixa rotação)	Mistura inicial de 25% da água + ligantes	60	1000rpm
	Pausa para limpeza	30	-
	Mistura dos componentes	60	1000rpm
	Pausa para limpeza e adição de 25% de água + 50% do superplastificante	30	-
	Mistura de todos os componentes da pasta	120	1000rpm
Argamassa (Argamassadeira)	Homogeneização agregados + água de absorção	90	60rpm
	Mistura pasta + agregados	60	135rpm
	Pausa para limpeza e adição de 50% do aditivo e restante da água	30	-
	Mistura dos componentes	210	135rpm
	Pausa para limpeza	30	-
	Mistura dos componentes	120	135rpm
	Inserção das fibras até notado a homogeneidade na mistura	-	135rpm

Fonte: Autoria própria (2024)

Contudo, partindo do método utilizado na moldagem do UHPCR, houve expansão volumétrica dos corpos de prova, ainda em seu estado fresco. Foi possível observar o aumento do volume da mistura nos moldes, logo após a moldagem e vibração, apresentado na Figura 13. Neste momento foi discutido se a origem do problema era física ou química. A partir da análise dos corpos de prova partidos e consultas na literatura, foram realizados testes com cada material de composição, em conjunto com as fibras.

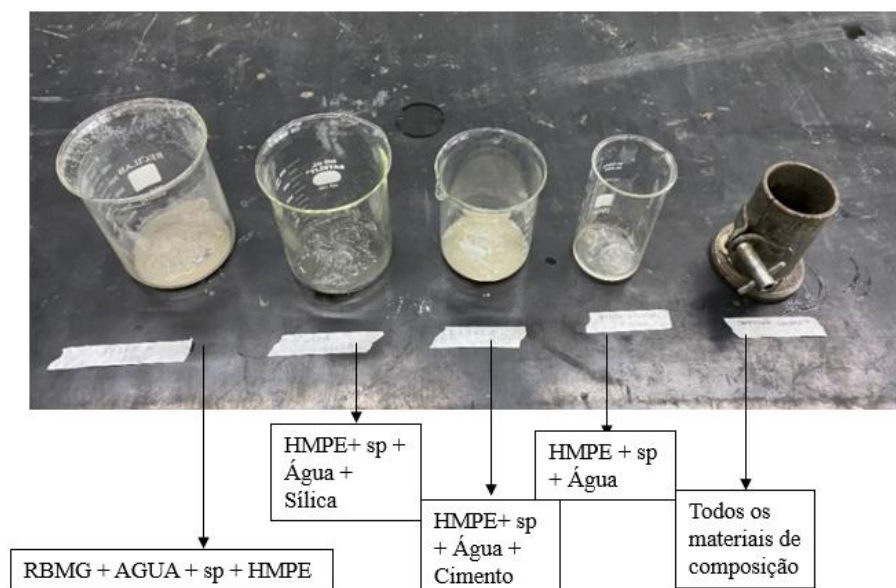
Figura 13 - Expansão volumétrica dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2024)

Foram executados testes individuais do superplastificante e fibras com cada um dos componentes do UHPC, sem agitação mecânica. A proposta era observar se havia a formação de bolhas, o que comprovaria que havia uma interação química entre as fibras e os componentes do UHPC. Esse fenômeno não foi observado (Figura 14) e foi iniciada uma análise para verificar se a expansão estava ocorrendo devido a um fenômeno físico.

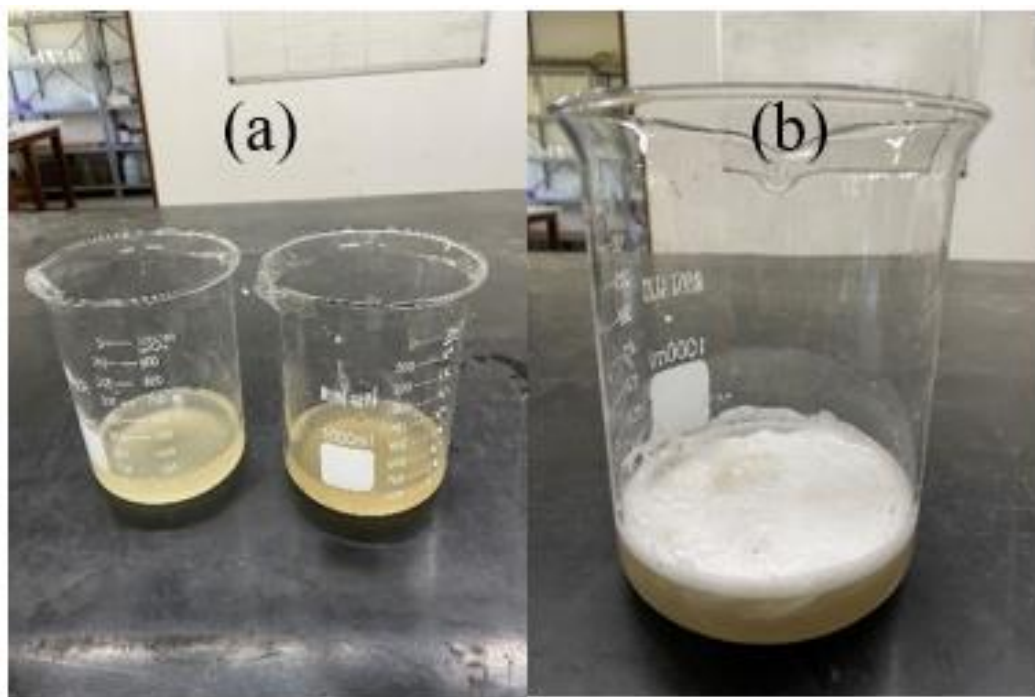
Figura 14 - Testes de superplastificante, fibras e água com: RBMG, Sílica, cimento, água



Fonte: Autoria própria (2024)

Em seguida, foi feita uma análise em relação apenas ao superplastificante, sendo analisados dois tipos (base de éter policarboxilato e de polímeros policarboxilato). O aditivo é conhecido por sua propensão à formação de espuma e por absorção de ar. Logo o efeito de formação de bolhas poderia ser mais visível analisando isoladamente esse componente do UHPC (WANG et al., 2023). Feita a agitação com misturador manual apenas dos superplastificantes, notou-se que as bolhas não se formaram em grande quantidade e, as que surgiram, se dispersaram quase instantaneamente. Na presença das fibras, observou-se nitidamente a formação de espuma na superfície, o que leva a crer que as fibras estavam promovendo o aprisionamento das bolhas e, conseqüentemente, o efeito expansivo do material.

Figura 15 - Análise da formação de espuma em superplastificantes, sem fibras (a) e com fibras (b)

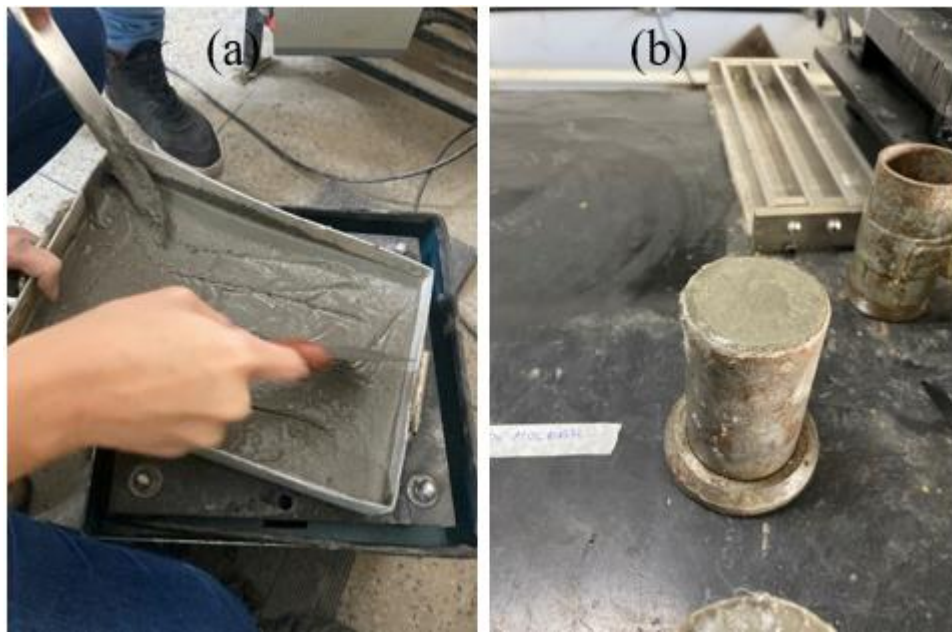


Fonte: Autoria própria (2024)

Visando reduzir o efeito expansivo, foi alterada a metodologia de inserção e misturas das fibras na matriz. Para isso, as fibras foram introduzidas na mistura, ainda na etapa final da Tabela 5, com a velocidade mais lenta da argamassadeira (60rpm), além disso, um processo extra de vibração foi adicionado ao método de mistura, que consiste em, após a inserção das fibras e homogeneização da mistura, levar o material para a mesa de vibração.

Nesse momento foi observado o aparecimento de diversas bolhas de ar que foram rompidas ao longo do processo com o auxílio de uma espátula, resultando no comportamento esperado dos corpos de prova. Após alguns minutos de inspeção visual, nenhuma expansão foi notada. O processo de vibração e o resultado podem ser observados na Figura 16:

Figura 16 - Liberação do ar incorporado no UHPCR (a) e corpo de prova com comportamento esperado (b).



Fonte: Autoria própria (2024)

Como o problema foi resolvido e, em posse do novo método de mistura, finalmente foi possível iniciar a produção e moldagens de UHPCFRH, que será abordado no próximo tópico.

3.7 Etapa 5: Produção e moldagem do UHPCFRH

O UHPC, com adição de fibras de HMPE, ficou com a nomenclatura de UHPCFRH. A adesão do novo método de mistura pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7 - Método de mistura UHPCFRH

Método	Ação	Tempo(s)	Velocidade
Pasta (Misturador de baixa rotação)	Mistura inicial de 25% da água + ligantes	60	1000rpm
	Pausa para limpeza	30	-
	Mistura dos componentes	60	1000rpm

	Pausa para limpeza e adição de 25% de água + 50% do superplastificante	30	-
	Mistura de todos os componentes da pasta	120	1000rpm
Argamassa (Argamassadeira)	Homogeneização agregados + água de absorção	90	60rpm
	Mistura pasta + agregados	60	135rpm
	Pausa para limpeza e adição de 50% do aditivo e restante da água	30	-
	Mistura dos componentes	210	135rpm
	Pausa para limpeza	30	-
	Mistura dos componentes	120	135rpm
	Vibrar e liberar o ar da mistura + separação das fibras para inserção	120	-
	Inserção das fibras até notado a homogeneidade na mistura	-	60rpm
	Vibrar e liberar o ar da mistura	120	-
	Fonte: Autoria própria (2024)		

Assim como no UHPC, o ensaio de espalhamento do UHPCFRH foi executado no final de cada moldagem. Para os ensaios no estado endurecido, assim como no UHPCR, o UHPCFRH ficou em cura em solução de cal e água por 28, 56 e 91 dias. Foram moldados 4 espécimes para cada ensaio. Esses processos serão apresentados a seguir.

3.8 Etapa 6: Ensaio no estado fresco e endurecido

Como citado anteriormente, as moldagens do UHPC e UHPCFRH passavam pela análise no estado fresco, antes da moldagem dos corpos de prova, definido pela NBR15823 (2017), no abatimento, foi utilizado uma mesa de consistência. O material foi inserido em três camadas, sendo compactado com 15, 10 e 5 golpes, em um cone de 130 ± 2 mm na base menor, 200 ± 2 mm de altura. Após a remoção do cone, foram aplicadas 30 quedas em 30 segundos, e

em seguida, três diâmetros foram medidos em pontos distintos classificados como D1, D2 e D3.

Figura 17 - Ensaio de abatimento



Fonte: Autoria própria (2024)

O ensaio no estado fresco foi mantido em todas as moldagens, após esse processo, eram moldados corpos de prova cilíndricos de 50x100 mm e formas prismáticas de 40x40x160 mm para análise da resistência à compressão e tração na flexão, respectivamente. Foram estudados três corpos de prova prismáticos e três cilíndricos para cada idade (28, 56 e 91 dias). O material era desmoldado após 24h e então ficava curando em água saturada em cal durante cada idade determinada.

Figura 18 - Molde para corpos de prova prismáticos e corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autoria própria (2024)

Para o ensaio de compressão, foi utilizada a prensa Amsler (50 toneladas), Figura 19, para rompimento à compressão à 500N/s, baseados na NBR 13279 (2005). Os corpos de prova cilíndricos eram usados, especificamente, para esse ensaio.

Figura 19 - Prensa de Amsler e ensaio de compressão corpo de prova prismático



Fonte: Autoria própria (2024)

No ensaio de resistência à tração na flexão, utilizou-se a prensa Shimadzu (10 toneladas) à 50N/s, pelo método de 3 pontos. Como foi mencionado anteriormente, os corpos de prova cilíndricos eram utilizados para o ensaio de compressão, portanto, para esse ensaio, somente corpos prismáticos eram submetidos à prensa Amsler (50 toneladas) para rompimento à compressão a 500N/s. Esse ensaio também segue a NBR 13279 (2005). Tanto a prensa utilizada quanto o ensaio pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 - Prensa Shimadzu e ensaio de tração na flexão



Fonte: Autoria própria (2024)

Por último, quanto a tenacidade, foram utilizados os dados obtidos do ensaio de tração na flexão. Avaliando as características geométricas do corpo de prova e a área correspondente ao deslocamento de $L/150$ e $L/600$. A área foi calculada no software *Origin*, onde são plotadas as curvas de Força (N) versus deslocamento (mm), e a área foi delimitada no ponto de deslocamento. Com os limites de cálculo da área definidos, a função de integração foi utilizada para determinar a área absoluta em todos os modelos (MACIEL, 2017).

Após o ensaio de tração na flexão, foi gerado um arquivo Excel (Figura 21) para cada corpo de prova ensaiado, onde foram extraídos os dados necessários para o resultado da tenacidade. É necessário a organização desses dados, por meio dos comandos “Localizar”, “Esquerda” e “Ext. Texto”, onde foi possível separar os dados em colunas referentes as suas categorias: tempo (seg), carga (N) deslocamento (mm), como observado na Figura 22.

Figura 21 – Exemplo de dados do ensaio de tração na flexão

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	1_1,,									
2	Tempo,"Força","Deslocamento"									
3	seg,"N","mm"									
4	0,"-0,1271566","0"									
5	0,01,"-0,1271566","0"									
6	0,02,"-0,1271566","2,083333E-05"									
7	0,03,"-0,1430511","2,083333E-05"									
8	0,04,"-0,1589457","2,083333E-05"									
9	0,05,"-0,1589457","6,25E-05"									
10	0,06,"-0,1589457","0,0001041667"									
11	0,07,"-0,1589457","0,0002291667"									
12	0,08,"-0,1430511","0,0004166667"									
13	0,09,"-0,1271566","0,000625"									
14	0,1,"-0,1589457","0,0008541666"									
15	0,11,"-0,1589457","0,0010625"									
16	0,12,"-0,1589457","0,001291667"									
17	0,13,"-0,1589457","0,0015"									
18	0,14,"-0,1589457","0,0016875"									
19	0,15,"-0,1589457","0,001895833"									
20	0,16,"-0,1589457","0,0020625"									

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 22 - Dados separados por categoria

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1_1,,							
2	Tempo,"Força","Deslocamento"	7	13					
3	seg,"N","mm"	5	7	9	12	seg	N	mm
4	0,"-0,1271566","0"	3	14	16	18	0	-0,1271566	0
5	0,01,"-0,1271566","0"	6	17	19	21	0,01	-0,1271566	0
6	0,02,"-0,1271566","2,083333E-05"	6	17	19	32	0,02	-0,1271566	2,083333E-05
7	0,03,"-0,1430511","2,083333E-05"	6	17	19	32	0,03	-0,1430511	2,083333E-05
8	0,04,"-0,1589457","2,083333E-05"	6	17	19	32	0,04	-0,1589457	2,083333E-05
9	0,05,"-0,1589457","6,25E-05"	6	17	19	28	0,05	-0,1589457	6,25E-05
10	0,06,"-0,1589457","0,0001041667"	6	17	19	32	0,06	-0,1589457	0,0001041667
11	0,07,"-0,1589457","0,0002291667"	6	17	19	32	0,07	-0,1589457	0,0002291667
12	0,08,"-0,1430511","0,0004166667"	6	17	19	32	0,08	-0,1430511	0,0004166667
13	0,09,"-0,1271566","0,000625"	6	17	19	28	0,09	-0,1271566	0,000625
14	0,1,"-0,1589457","0,0008541666"	5	16	18	31	0,1	-0,1589457	0,0008541666
15	0,11,"-0,1589457","0,0010625"	6	17	19	29	0,11	-0,1589457	0,0010625
16	0,12,"-0,1589457","0,001291667"	6	17	19	31	0,12	-0,1589457	0,001291667
17	0,13,"-0,1589457","0,0015"	6	17	19	26	0,13	-0,1589457	0,0015
18	0,14,"-0,1589457","0,0016875"	6	17	19	29	0,14	-0,1589457	0,0016875
19	0,15,"-0,1589457","0,001895833"	6	17	19	31	0,15	-0,1589457	0,001895833
20	0,16,"-0,1589457","0,0020625"	6	17	19	29	0,16	-0,1589457	0,0020625

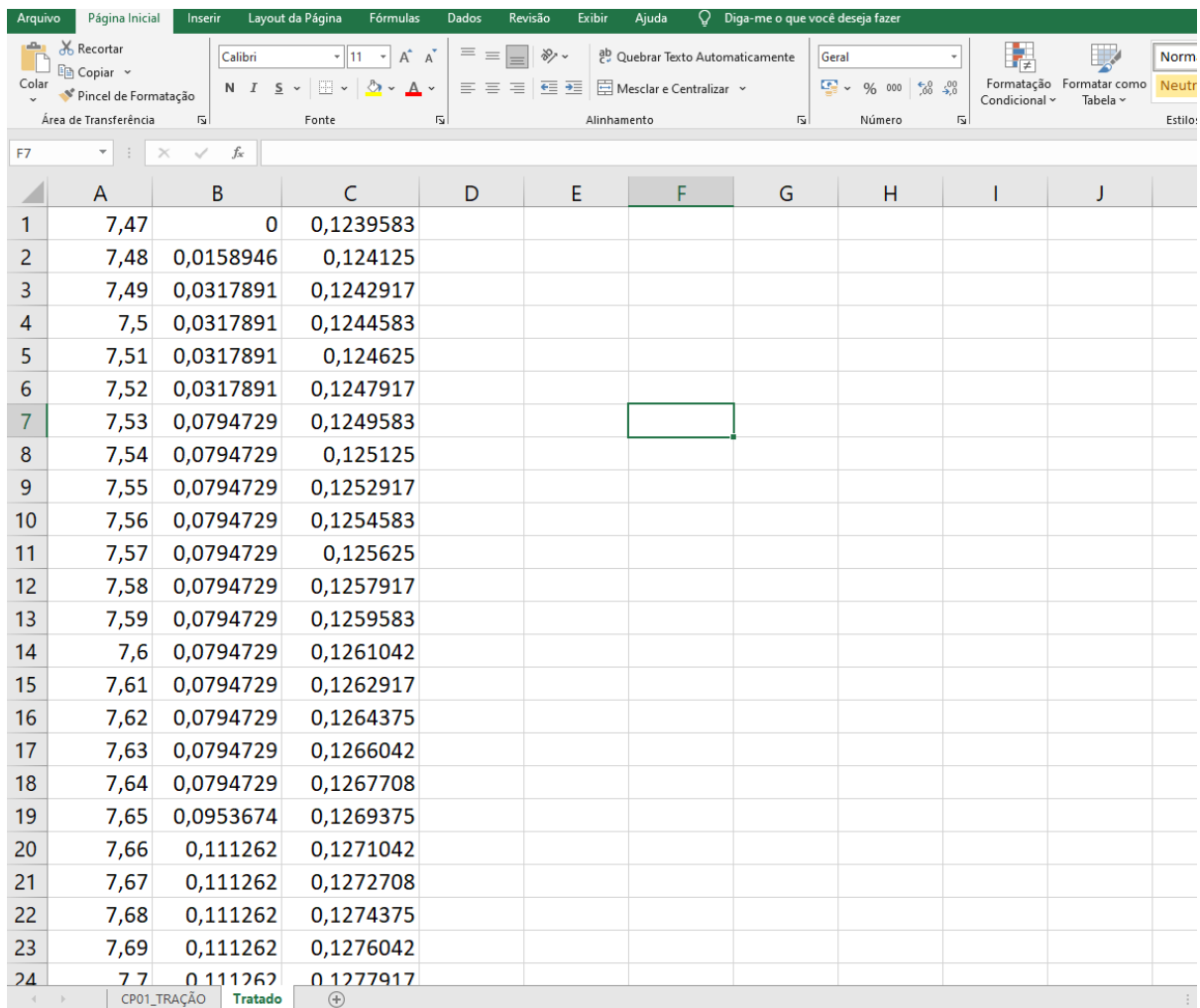
Fonte: Autoria própria (2024)

Em posse dos dados categorizados, iniciou-se o processo de tratamento desses dados. Durante a fase inicial do ensaio de tração na flexão, houve um momento de ajustes do corpo de prova na prensa e que geram dados equivocados, como por exemplo de carga(N) negativa, visto na coluna G e linha 4 da Figura 22. Esses dados não interferem no resultado do ensaio de tração na flexão, contudo, para obter o resultado real da tenacidade, foi preciso excluir os valores negativo de carga e, da mesma forma, excluir os valores que não resultaram um crescimento linear de deslocamento (mm), pois ainda seria parte do processo de ajuste do ensaio.

Continuando o exemplo anterior, a

Figura 23 mostra como devem ficar os dados após exclusão da parte inapropriada do ensaio de tração na flexão. Percebe-se que na coluna B, carga (N), apresentou-se o valor inicial nulo e, nesse momento, o deslocamento inicial foi vinculado a esse valor, portanto igual à 0,1239583.

Figura 23 - Dados tratados



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	7,47	0	0,1239583							
2	7,48	0,0158946	0,124125							
3	7,49	0,0317891	0,1242917							
4	7,5	0,0317891	0,1244583							
5	7,51	0,0317891	0,124625							
6	7,52	0,0317891	0,1247917							
7	7,53	0,0794729	0,1249583							
8	7,54	0,0794729	0,125125							
9	7,55	0,0794729	0,1252917							
10	7,56	0,0794729	0,1254583							
11	7,57	0,0794729	0,125625							
12	7,58	0,0794729	0,1257917							
13	7,59	0,0794729	0,1259583							
14	7,6	0,0794729	0,1261042							
15	7,61	0,0794729	0,1262917							
16	7,62	0,0794729	0,1264375							
17	7,63	0,0794729	0,1266042							
18	7,64	0,0794729	0,1267708							
19	7,65	0,0953674	0,1269375							
20	7,66	0,111262	0,1271042							
21	7,67	0,111262	0,1272708							
22	7,68	0,111262	0,1274375							
23	7,69	0,111262	0,1276042							
24	7,7	0,111262	0,1277917							

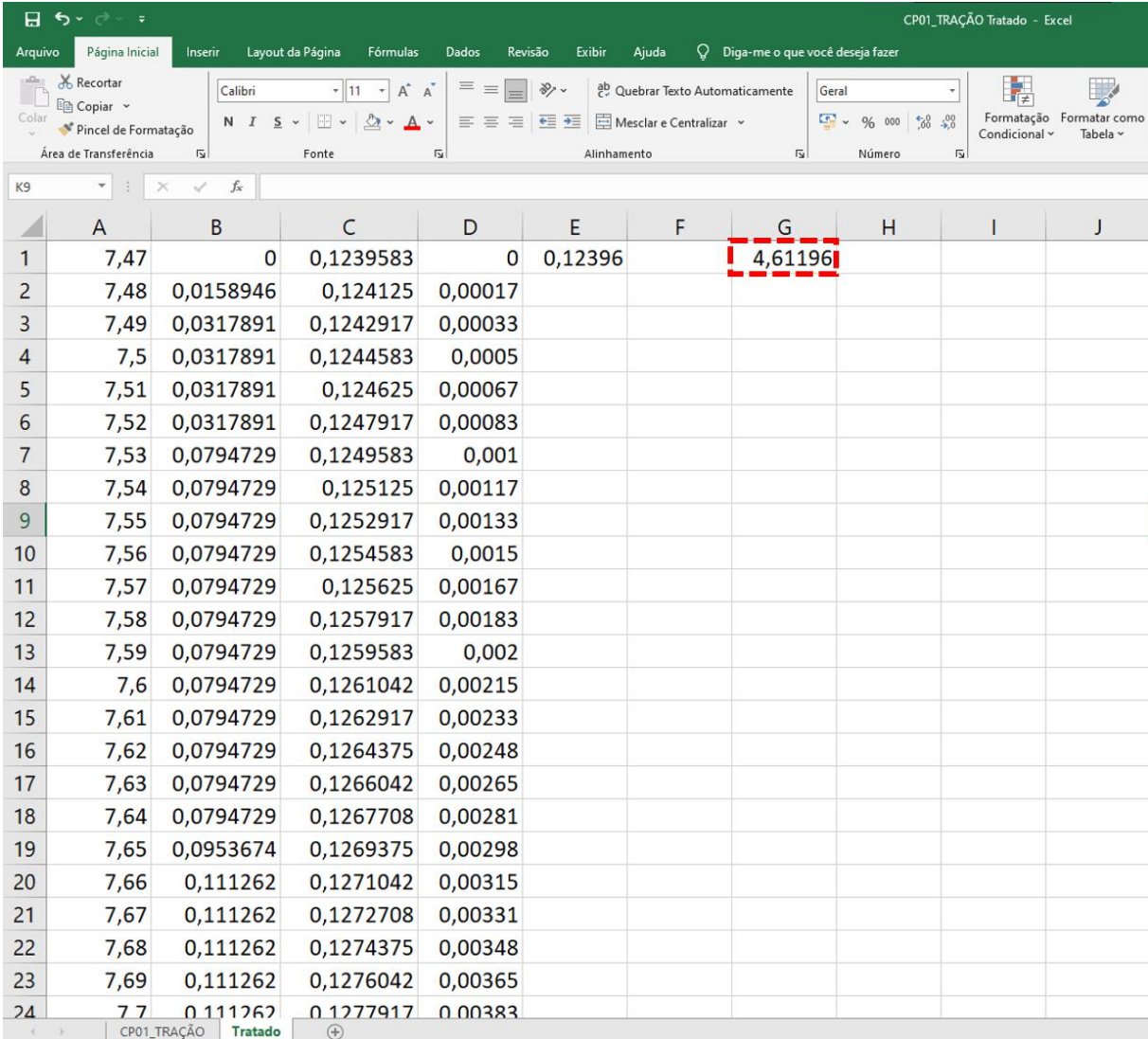
Fonte: Autoria própria (2024)

Em seguida, para que fosse apresentado o deslocamento corrigido, fixou-se o descolamento inicial e foi subtraído de todos os valores da coluna C de deslocamentos, lido pela prensa do ensaio, assim, obtendo-se o deslocamento real do corpo de prova ensaiado.

Esse processo pode ser observado na Figura 24. A coluna D representa o deslocamento real de cada dado lido pela prensa Shimadzu. O valor da coluna E foi o deslocamento inicial fixado e a coluna D foi formulada através da subtração de cada valor da coluna de deslocamento C pelo valor inicial fixado.

O valor destacado em vermelho, Figura 24, representa o valor máximo da coluna D de deslocamento real do corpo de prova. ele é necessário para limitar os intervalos do cálculo da tenacidade usado no programa *Origin*, descrito a seguir.

Figura 24 - Dados com deslocamentos reais e deslocamento máximo destacado em vermelho

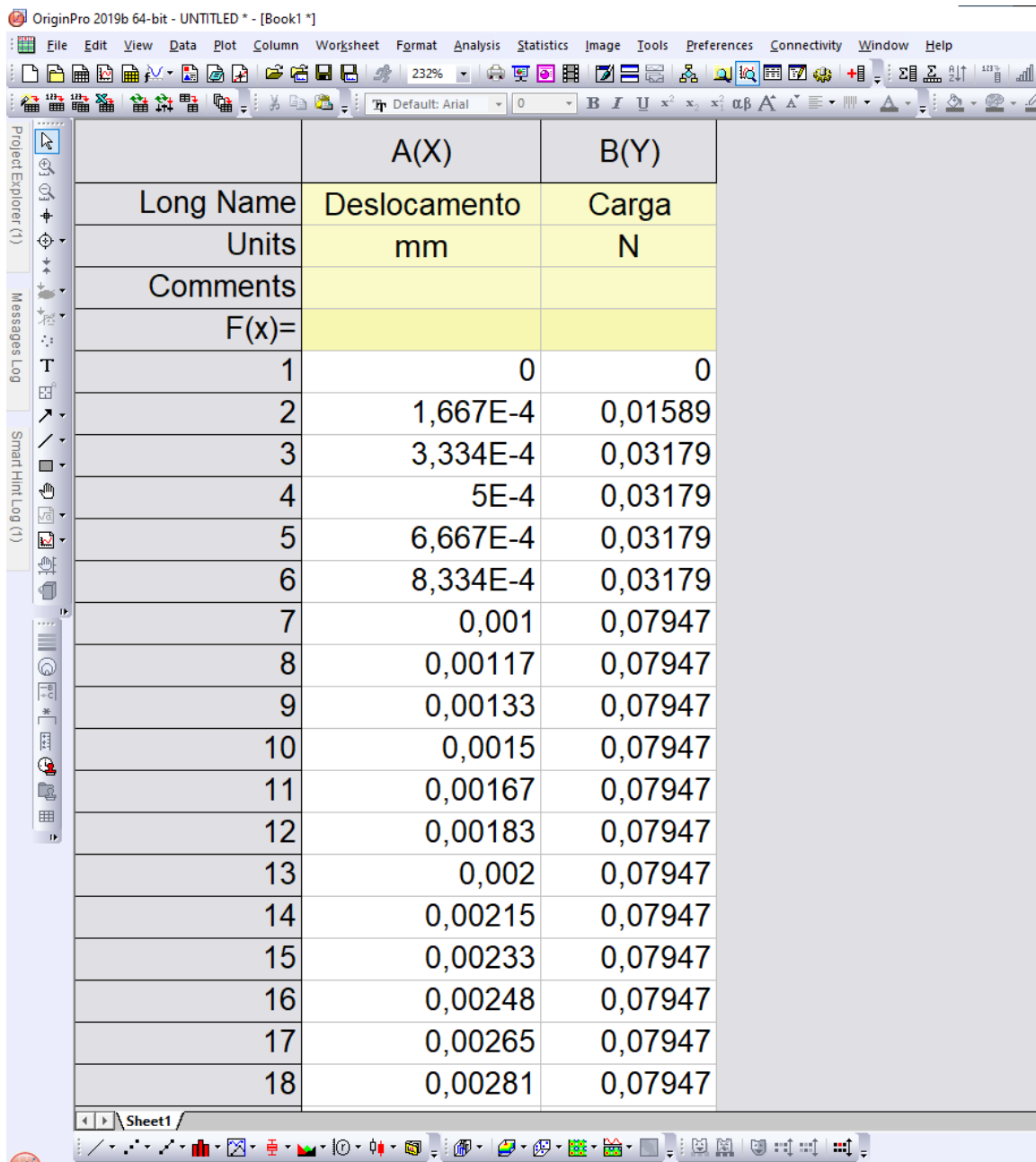


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	7,47	0	0,1239583	0	0,12396		4,61196			
2	7,48	0,0158946	0,124125	0,00017						
3	7,49	0,0317891	0,1242917	0,00033						
4	7,5	0,0317891	0,1244583	0,0005						
5	7,51	0,0317891	0,124625	0,00067						
6	7,52	0,0317891	0,1247917	0,00083						
7	7,53	0,0794729	0,1249583	0,001						
8	7,54	0,0794729	0,125125	0,00117						
9	7,55	0,0794729	0,1252917	0,00133						
10	7,56	0,0794729	0,1254583	0,0015						
11	7,57	0,0794729	0,125625	0,00167						
12	7,58	0,0794729	0,1257917	0,00183						
13	7,59	0,0794729	0,1259583	0,002						
14	7,6	0,0794729	0,1261042	0,00215						
15	7,61	0,0794729	0,1262917	0,00233						
16	7,62	0,0794729	0,1264375	0,00248						
17	7,63	0,0794729	0,1266042	0,00265						
18	7,64	0,0794729	0,1267708	0,00281						
19	7,65	0,0953674	0,1269375	0,00298						
20	7,66	0,111262	0,1271042	0,00315						
21	7,67	0,111262	0,1272708	0,00331						
22	7,68	0,111262	0,1274375	0,00348						
23	7,69	0,111262	0,1276042	0,00365						
24	7,7	0,111262	0,1277917	0,00383						

Fonte: Autoria própria (2024)

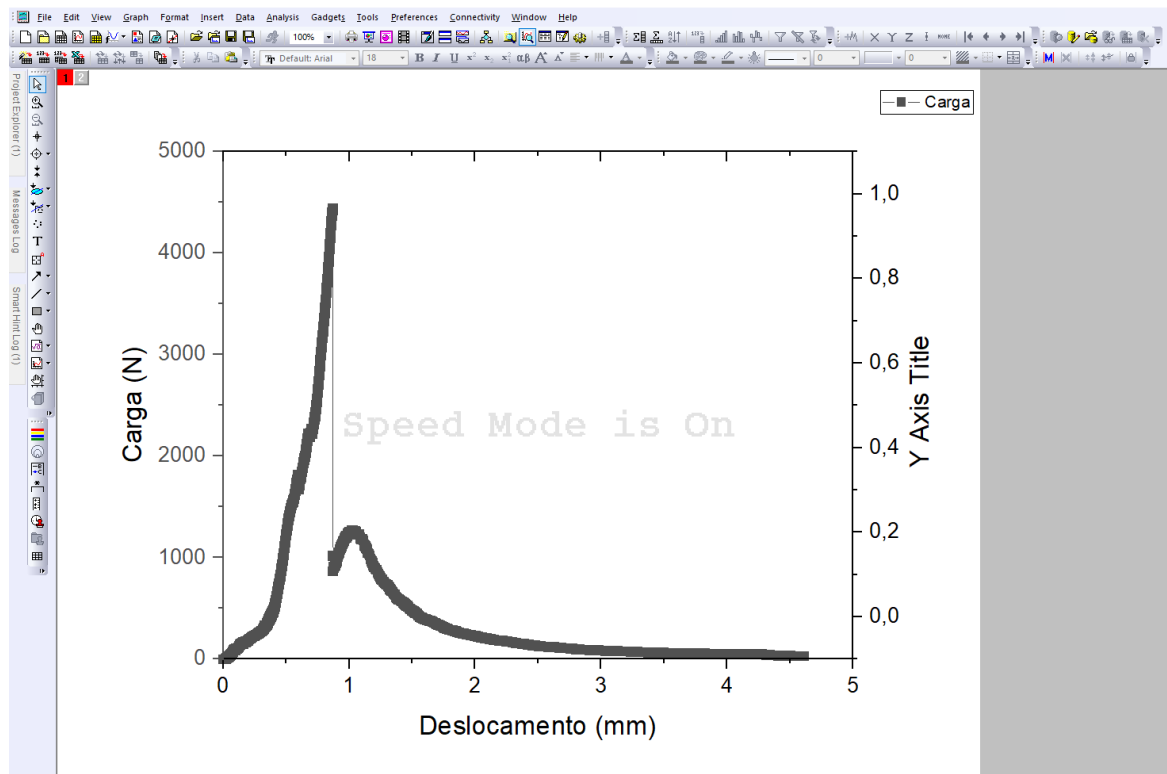
A partir dos dados mostrados anteriormente, foi possível utilizar o software *Origin* para gerar um gráfico de Carga (N) x Deslocamento (mm), e com a ferramenta de integração, calcular a área abaixo do gráfico. Esse valor obtido é referente a tenacidade do corpo de prova ensaiado em tração na flexão. Para isso, os dados de carga (N) e deslocamento (mm), coluna B e D respectivamente da Figura 24, são inseridos no programa, onde é gerado um gráfico de carga por deslocamento, Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 - Inserção dos dados no software *Origin*



	A(X)	B(Y)
Long Name	Deslocamento	Carga
Units	mm	N
Comments		
F(x)=		
1	0	0
2	1,667E-4	0,01589
3	3,334E-4	0,03179
4	5E-4	0,03179
5	6,667E-4	0,03179
6	8,334E-4	0,03179
7	0,001	0,07947
8	0,00117	0,07947
9	0,00133	0,07947
10	0,0015	0,07947
11	0,00167	0,07947
12	0,00183	0,07947
13	0,002	0,07947
14	0,00215	0,07947
15	0,00233	0,07947
16	0,00248	0,07947
17	0,00265	0,07947
18	0,00281	0,07947

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 26 - Gráfico gerado pelo *Origin*

Fonte: Autoria própria (2024)

Finalmente, o software conseguiu fazer um cálculo da área abaixo da curva da Figura 26. Para isso foi necessário acionar a ferramenta “Integrate”, através do caminho: Analysis > Mathematics > Integrate > Open Dialog. A Figura 27, a seguir, mostra a caixa de ferramenta acionada para inserção das configurações de cálculo da área abaixo da curva. Nela é necessário delimitar o intervalo do eixo das abscissas que foi utilizado para cálculo da tenacidade, foi utilizado do valor inicial 0 até o valor máximo de cada deslocamento real dos corpos de prova.

No caso exemplificado anteriormente, o intervalo se encontra entre 0 até 4,61196mm, para inserir manualmente basta selecionar a opção “Input”, expandir a opção “Rows” e modificar as caixas de “From” e “To” para os valores tratados do corpo de prova, ainda na Figura 27, é possível ver o caminho utilizado nas partes destacados em vermelho.

Ao selecionar “Ok” foi finalizado o processo e gerado o valor da integração da área abaixo da curva, ou tenacidade do CP utilizado, visto em vermelho na Figura 28. Para esse exemplo o valor encontrado foi de 2031,93 N.mm.

Figura 27 - Caixa de ferramentas para cálculo da tenacidade

Integrate: integ1

Dialog Theme

Integrate XY data

Results Log Output ☒

Recalculate Manual

Input

Range 1

X [Graph1]!1:"Carga"[x0:4,6119587]

Y [Graph1]!1:"Carga"[x0:4,6119587]

Rows By X

From 0

To 4,6119587

Use End Points Straight Line as Baseline ☐

Area Type Mathematical Area

Output Quantities

☒ Integral Curve Data (<input>, <new>)

☐ Integration Result

Plot Integral Curve None

OK Cancel

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 28 - Valor em N.mm obtido para o exemplo

Results Log

Output

oy(Integral Curve Data) = [Book1]Sheet1!(C"Integrated Y1")

[2:13323]

x1(Beginning X) = 0

x2(Ending X) = 4,6119587

i1(Index for Beginning X) = 2

i2(Index for Ending X) = 13323

area(Area of the Integration) = 2031,9352676865

y0(Maximum Height) = 4443,502

x0(X Value in Maximum Height) = 0,8679792

dx(Peak Width at Half Height) = 0,19565209433554

Fonte: Autoria própria (2024)

Vale ressaltar que todo o processo de tenacidade foi realizado em todos os corpos de provas moldados, tanto para UHPCR quanto para UHPCFRH.

4 RESULTADOS

Para essa seção, serão apresentados: a caracterização da fibra de HMPE e os resultados obtidos para todos os ensaios propostos e indispensáveis para classificar o concreto como de ultra alto desempenho. Pela ordem, os resultados serão expostos do estado fresco ao estado endurecido, onde serão comparados os dados obtidos do UHPCR e UHPCFRH.

4.1 HMPE

A da fibra adquirida em rolo e passou pelo método de corte mencionado anteriormente, a fibra cortada e o volume gerado durante as sessões de corte pode ser observadas na Figura 29. A sua caracterização, por sua vez, foi fornecida pelo fabricante e está disposta na Tabela 3.

Figura 29 - Volume gerado para futuras moldagens



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2 Espalhamento

Os valores encontrados para o ensaio de espalhamento estão na Tabela 8 a seguir, é possível observar que todos as dosagens ficaram acima do limite mínimo de 270mm. Entretanto, o espalhamento foi reduzido de acordo com o acréscimo da quantidade de fibras na mistura, isso ocorre devido a composição da fibra de HMPE, seus multifilamentos restringem a fluidez e mobilidade da mistura, devido ao aumento do atrito entre essas os outros materiais. É importante perceber que, além da adição dessa fibra, o UHPC possui baixa relação a/agl que naturalmente prejudica sua consistência.

Tabela 8 - Resultados do espalhamento

Espalhamento	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	Média(mm)
UHPCR	287,0	277,0	288,0	284,0
UHPCFRH10	276	277	283	278,7
UHPCFRH15	275	272	281	276,0

Fonte: Autoria própria (2024)

4.3 Resistência à compressão

Referente à resistência à compressão, o UHPCR superou a resistência de 120MPa aos 56 dias, atingindo 130,09MPa aos 91 dias. Entretanto, é possível analisar na Tabela 9 e Figura 30 que a adição de fibras prejudicou essa propriedade mecânica, a dosagem UHPCFRH10 só alcançou o mínimo normativo com 120,61MPa somente aos de 91, enquanto a UHPCFRH15 ficou um pouco abaixo (119,94MPa) desse requisito.

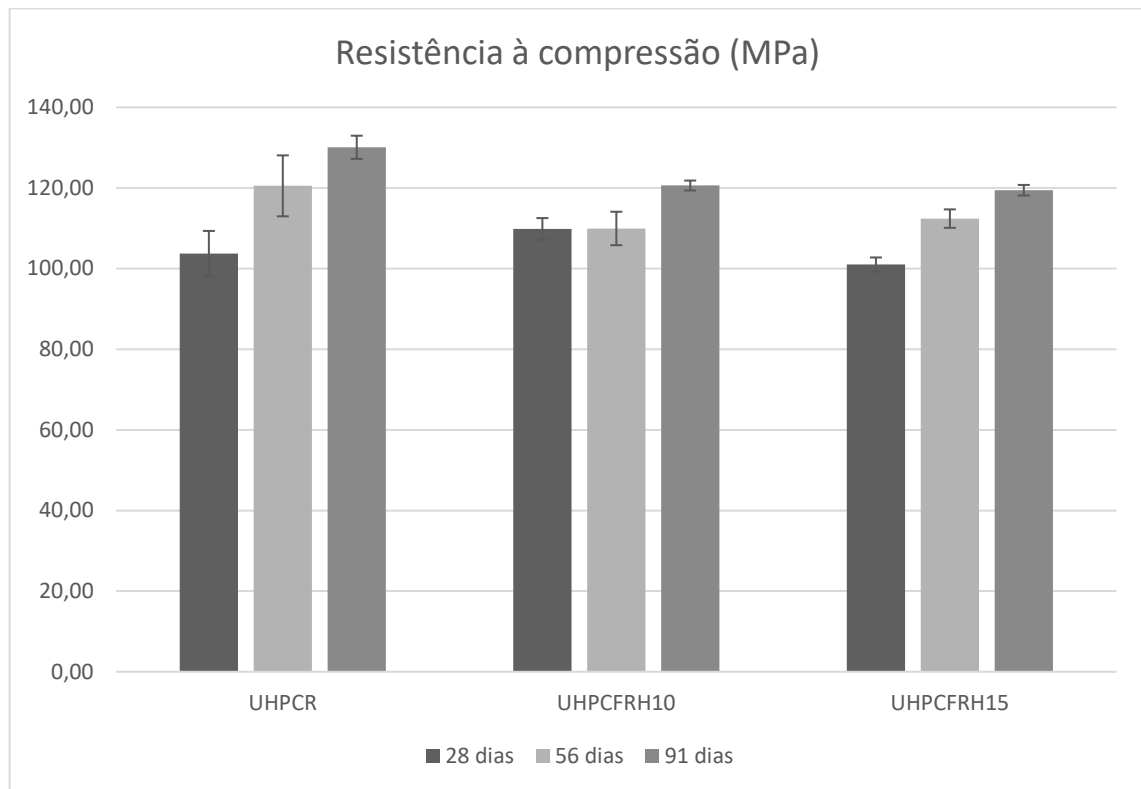
Esse resultado pode estar ligado à formação de emaranhados de HMPE ou pelo aumento de vazios formado pela presença das fibras na matriz. Isso contribuiu para a formação de zonas com concentrações de tensões que diminuem a capacidade de carga do material

Tabela 9 - Resistência à compressão média obtida

Resistência à Compressão média (MPa)			
Dosagem	28 dias	56 dias	91 dias
UHPCR	103,71	120,52	130,09
UHPC10	109,83	109,95	120,61
UHPC15	101,01	112,40	119,44

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 30 - Resistência à compressão média obtida



Fonte: Autoria própria (2024)

4.4 Resistência à tração na flexão

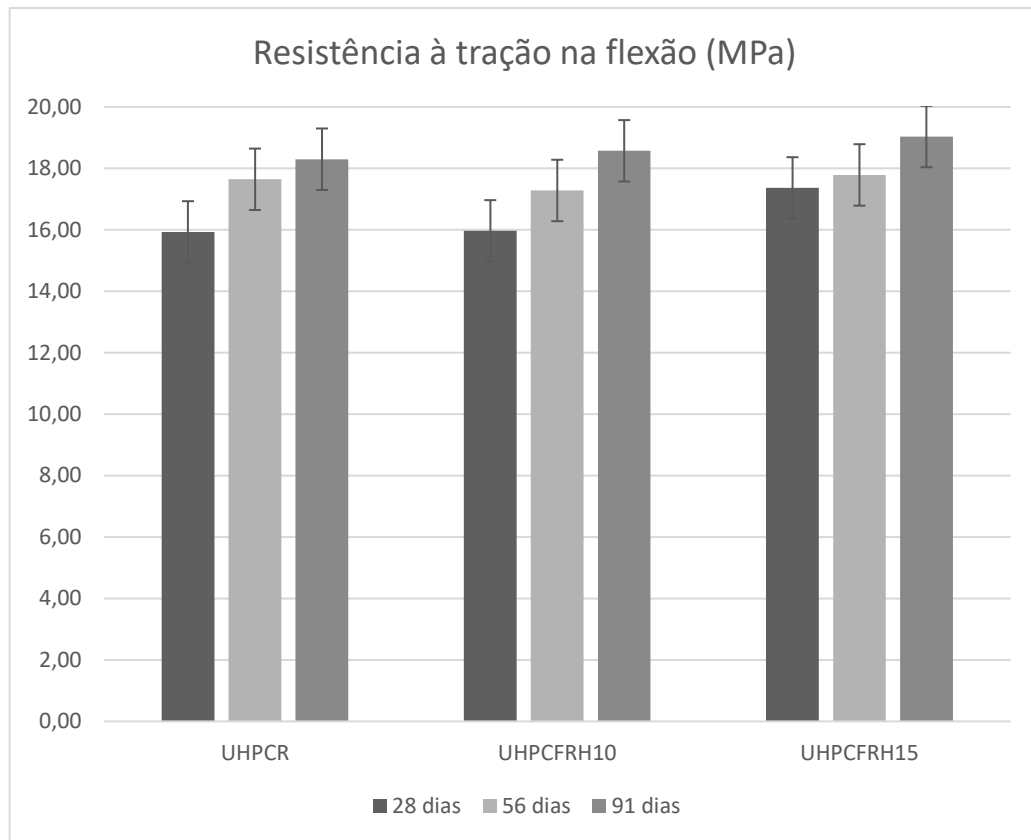
Quanto a resistência a tração na flexão, os resultados são apresentados na Tabela 10 e Figura 31. É possível observar que todas as dosagens superaram o mínimo de 6MPa, também é notado que com a adição e acréscimo da quantidade de fibras resultou na evolução na resistência à flexão de UHPCFRH comparados com UHPCR.

Tabela 10 - Resistência à tração na flexão média obtida

Resistência à tração na flexão média (MPa)			
Dosagem	28 dias	56 dias	91 dias
UHPCR	15,93	17,64	18,30
UHPCFRH10	15,97	17,28	18,57
UHPCFRH15	17,36	17,79	19,04

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 31 - Resistência à tração na flexão média obtida



Fonte: Autoria própria (2024)

Vale destacar UHPCR aos 91 dias atingiu 18,30MPa, mais que três vezes o desejado, ainda assim esse valor foi superado pelo UHPCFRH10 com 18,57MPa aos 91 dias e, com o melhor desempenho, o UHPCFRH15 com 19,04MPa, também aos 91 dias. Esse benefício é atribuído a capacidade das fibras de absorver parte da energia de tração na flexão sofrida pelo UHPC, controlando a abertura das fissuras e concedendo melhor resistência mecânica.

4.5 Tenacidade

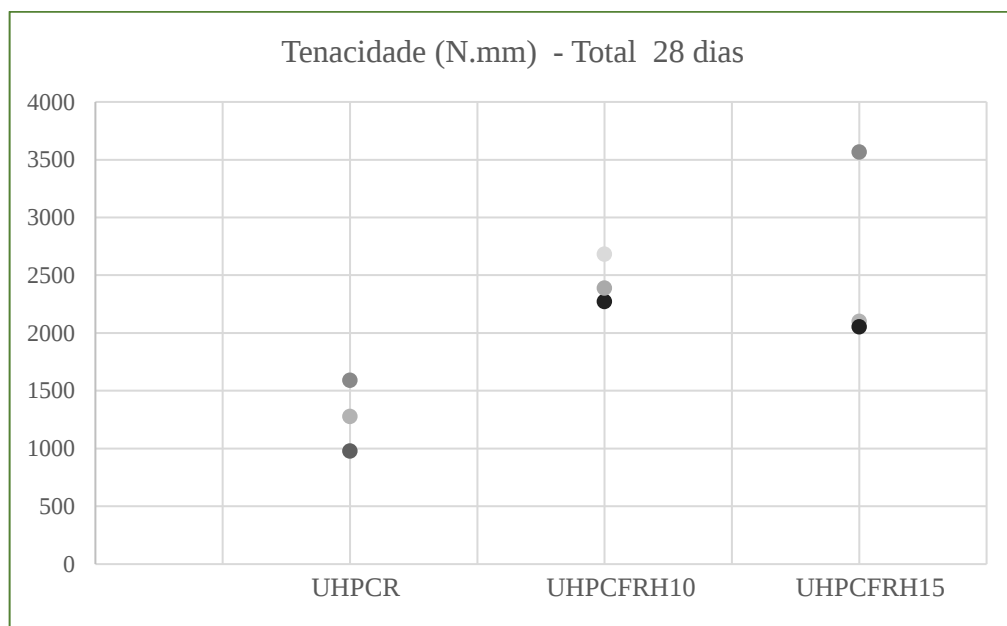
Por fim, a tenacidade foi analisada de acordo com os dados obtidos do ensaio de tração na flexão, a partir do software *Origin* foi calculado a área abaixo da curva de tensão(N) x deformação(mm) dos corpos de prova.

Na Figura 32 é possível observar o ganho de tenacidade com o aumento da quantidade de fibras incorporada, mostrando o comportamento superior dos compósitos quando comparados com o UHPCR. O mesmo comportamento foi observado para 56 dias (Figura 33) e 91 dias (Figura 34) para a UHPCFRH15.

Nota-se, portanto, que desde as idades iniciais, a maior quantidade de adição de fibras promoveu melhoras significativas nessa propriedade, para 28 dias o UHPCFRH15 superou em 55% o UHPCR, 3568,04 N.mm da fibra contra 1592,07 N.mm da referência, em valores máximos.

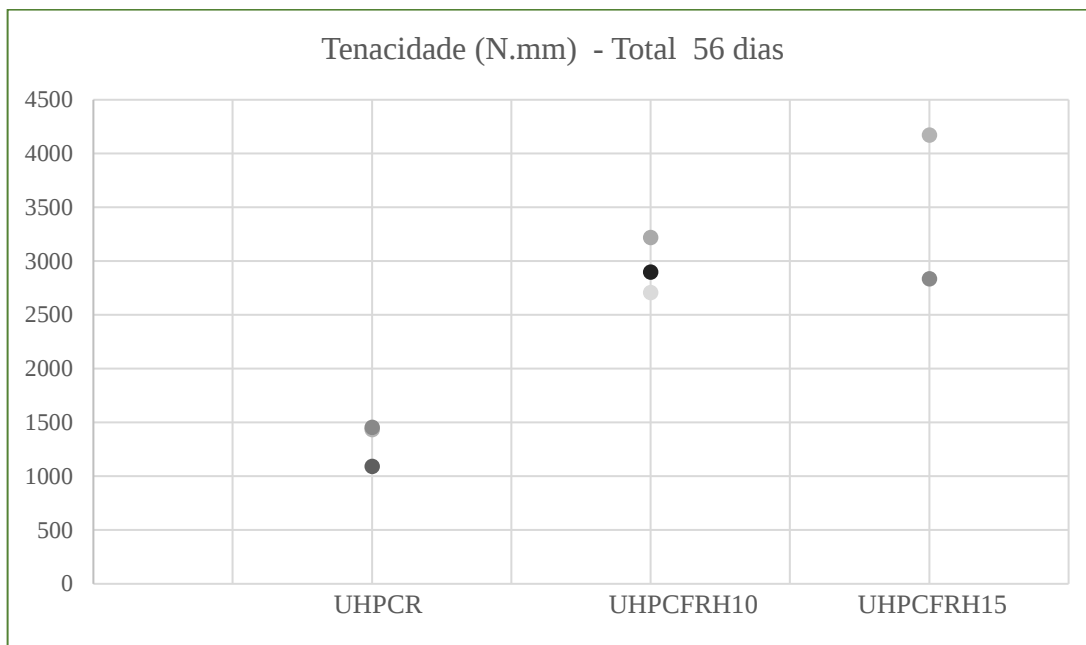
Portanto, a adição das fibras contribui de forma significativa no comportamento do compósito quanto à tenacidade, contudo para idades mais avançadas os acréscimos de fibras geraram menos acréscimo de tenacidade. Entretanto, os resultados ainda são em ordem de grandeza significativa. Para 91 dias, o UHPCFRH15 com 3830,8 N.mm superou em 39% o UHPCR, que obteve o máximo de 2332,62 N.mm.

Figura 32 - Tenacidade total aos 28 dias



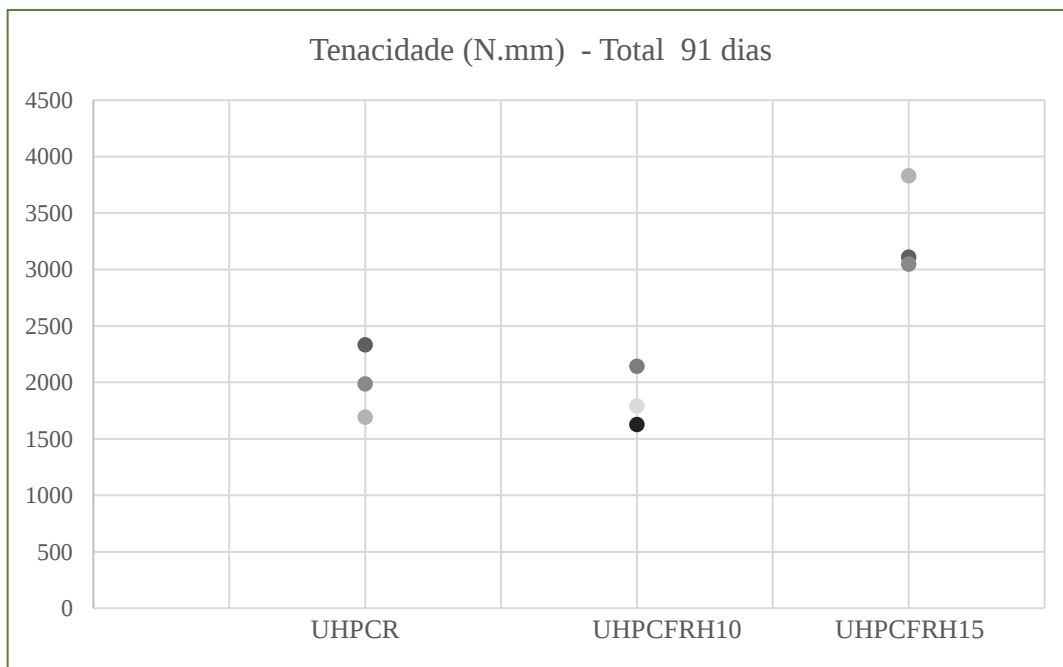
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 33 – Tenacidade total aos 56 dias



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 34 - Tenacidade total aos 91 dias



Fonte: Autoria própria (2024)

Os valores de tenacidade encontrados para as fibras de HMPE em composição com misturas cimentícias acompanham o que é apresentado na literatura, Amaral Junior (2016), em seu trabalho, constatou melhoras 29% em tenacidade, quando comparado a concreto sem fibras.

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho forneceu uma avaliação sobre o método de inserção das fibras HMPE e interação com outros componentes no UHPC, assim como sua dosagem, a partir da análise do comportamento no estado fresco e endurecido.

Foi concluído que a adição de fibras reduziu a resistência à compressão do concreto de referência. Essa reação já era previsível, como foi abordado no referencial teórico, devido à composição de multifilamentos, que pode gerar a formação de nódulos ou emaranhados na mistura, criando concentrações de tensões e reduzindo esse parâmetro. Entretanto, em função da baixa espessura da fibra, observa-se que a redução não foi tão significativa, sendo possível verificar que, mesmo na dosagem com 0,15% de HMPE, os valores atingiram cerca de 120 MPa.

No que diz respeito a resistência à tração na flexão, o UHPCR já apresentou um valor elevado, 18,30MPa, porém ambas as dosagens de UHPCFRH10 e UHPCFRH15 o superaram, atingindo, respectivamente, 18,57MPa e 19,04MPa.

Por fim, em relação à tenacidade, ambas as dosagens de fibras apresentaram melhorias significativas quando comparadas ao concreto de referência. Os melhores resultados foram observados durante este teste, o que já era esperado para esse tipo de fibra, confirmando o potencial do uso da fibra de HMPE. Verificou-se uma tendência de aumento da tenacidade, com ganhos de até 55% em idades iniciais e até 39% nos valores máximos obtidos, evidenciando sua adequação para aplicações que demandem essa propriedade específica da fibra estudada.

Assim, por meio deste trabalho, foi possível desenvolver uma metodologia de corte da fibra de HMPE, um método de mistura eficiente para a obtenção de UHPCR com adição dessa fibra e foi verificado a influência da presença das fibras no comportamento no estado fresco e endurecido do UHPCFRH.

Através dos resultados apresentados, é possível concluir que a inserção de fibras de HMPE gerou um ganho relevante de tenacidade, portanto, encoraja-se a realização de estudos para desenvolvimento de novos métodos de moldagens, principalmente um que elimine a necessidade do misturador adaptado ou uma otimização do método de mistura das fibras, que pudesse eliminar o ar aprisionado de forma mais eficiente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823**. Concreto autoadensável. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1 - Requisitos. Rio de Janeiro 2019.

AFROUGHSAKET, V.; BIOLZI, L.; OZBAKKALOGLU, T. **High-performance fiber-reinforced concrete: a review**. *Journal of Materials Science*. Springer New York LLC, , 1 jul. 2016.

AHMAD, J.; ZHOU, Z. Mechanical Properties of Natural as well as Synthetic Fiber Reinforced Concrete: A Review. **Construction and Building Materials**. Elsevier Ltd, , 23 maio 2022.

AKHNOUKH, A. K.; BUCKHALTER, C. Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, 1 dez. 2021.

ALMADA, B. S.; SANTOS, W. J. DOS; SOUZA, S. R. Marble and granite waste as mineral addition in mortars with different water-cement ratios. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 4, p. 7–22, dez. 2022.

ALTAIR SANTOS. **Diferentes tipos de fibras**. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/fibras-para-concreto/>>. Acesso em: 1 out. 2024.

AMARAL JUNIOR, J. C. **Avaliação da influência da adição de fibras poliméricas nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)—Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, maio 2016.

AZMEE, N. M.; SHAFIQ, N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, 1 dez. 2018.

BACHE, H. H. **Densified cement ultra-fine particle-based materials**. 1981.

BALESTRA, C. E. T.; OZELAME, J. S.; SAVARIS, G. Efeito da adição de fibras de aço e poliméricas na resistência à compressão do concreto de ultra alto desempenho. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 16, n. 1, p. 26–35, 11 maio 2020.

CHRIST, R. et al. **Study of mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid fibers and with reduced cement consumption** Estudio del comportamiento mecánico del hormigón de ultra-altas prestaciones (UHPC) reforzado con fibras híbridas y con consumo reducido de cemento. 2019.

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. Tese de Doutorado—São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, 2019.

CHRIST, R.; TUTIAKIAN, B.; HELENE, P. **Concreto de ultra alto desempenho: UHPC - Fundamentos, propriedades e dosagem**. 1ª ed. ed. São Paulo: Leud, 2022.

CHRIST, R.; TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Método de dosagem UNISINOS para UHPC. **Concreto & Construções**, v. XLIX, n. 105, p. 30–33, 2022.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. ~ **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994a.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. ~ **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994b.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1699–1704, 2002.

- DSM. **Dynemna high-strength, high-modulus polyethylene fiber. Manual técnico.** , 2008.
- DU, J. et al. **New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). Composites Part B: Engineering**Elsevier Ltd, , 1 nov. 2021.
- FIGUEIREDO, A. D. DE. **Concreto com fibras.** Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.
- LI, J. et al. **Durability of ultra-high performance concrete – A review. Construction and Building Materials**Elsevier Ltd, , 20 set. 2020.
- LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. DE. Considerations on the efficiency of Portland cement concrete mixtures based on the particle packing concept. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.
- MACIEL, P. DE S. **Análise da infraestrutura de pavimento rígido com reforço diferenciado de fibras de aço.** Dissertação de Mestrado—Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, jun. 2017.
- MACIEL, P. S. et al. Study to obtain UHPC with addition of silica and MGW. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, v. 17, p. 341–354, 2024.
- MENG, W.; KHAYAT, K. H. Effect of Hybrid Fibers on Fresh Properties, Mechanical Properties, and Autogenous Shrinkage of Cost-Effective UHPC. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 4, abr. 2018.
- MULLER, R. M.; KOELLE, P.; ALMEIDA, C. N. A utilização de UHPC em obras no Brasil. https://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao87/files/assets/basic-html/index.html#57, p. 57–62, 2017.
- PERRY, V. **What Really is Ultra-High Performance Concrete?-Towards a Global Definition.** 2018.

SCHMIDT, M.; FEHLING, E. Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe. **ACI Spec.**, v. 228, p. 51–78, 2005.

SILVA NETO, J. T. DA. **Compósito cimentício reforçado com fibras poliméricas de alta resistência mecânica**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto. 2018.

WANG, Y. et al. Influences of admixture combinations on the formation and stability of air bubbles in fresh cementitious materials. **Journal of Building Engineering**, v. 76, 1 out. 2023.

ZOLLO, R. F. Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 107–122, 1997.

ANEXO A – Study to obtain UHPC with addition of silica and MGW

International Journal of Advances in Engineering & Technology, August, 2024.

©IJAET

ISSN: 22311963

STUDY TO OBTAIN UHPC WITH ADDITION OF SILICA AND MGW

Priscila de Souza Maciel^{1,2}, Maria Luiza Malta da Rocha Silva¹, Ingrid Vieira Fernandes Monteiro¹ and Paulo Cesar Correia Gomes¹¹Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, Brasil²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, Maceió/AL, Brasil
priscila.maciel@ifal.edu.br¹Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, Brasilmaria.rocha@ctec.ufal.br¹Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, Brasilingrid_vfmonteiro@hotmail.com¹Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, Brasilpgomes@ctec.ufal.br

ABSTRACT

Ultra-high performance concrete (UHPC) is a specialized concrete with high durability and compressive strength due to its dense structure and low porosity. This study investigated UHPC mixtures with mineral and chemical additions to meet the regulatory parameters for classification as UHPC at 56 days: spread of 270 mm, flexural tensile strength of 6 MPa, and compressive strength of 120 MPa. Variations in Marble and Granite Waste (MGW), silica, superplasticizer, and water were studied. MGW and sand characterization was performed. Consistency and volumetric/mass variation were analyzed in the fresh state, while flexural tensile and compressive strengths were examined in the hardened state. The best-performing mix, with 50% MGW, 20% silica, 1.5% superplasticizer, and w/b=0.23, had the best performance, exhibiting minimum values at 56 days, reaching 130 MPa compressive strength at 91 days, highlighting the potential of MGW and silica in UHPCs.

KEYWORDS: *Ultra-High Performance Concrete, Silica & MGW.*

I. INTRODUCTION

To achieve high-performance structures that use inputs efficiently and meet regulatory standards, even in the most extreme environments, ultra-high performance concretes (UHPCs) show great potential in civil construction due to their excellent mechanical properties and durability [1]. UHPC combines the properties of high-performance concrete and self-compacting concrete, offering high mechanical strength and workability, among other advantages [2].

Ultra-high performance materials are typically composed of cement, quartz powder, fly ash, silica fume, quartz sand, superplasticizers, and steel fibers [3]. The high compactness and density of the UHPC matrix contribute to its excellent performance, as well as its low permeability, which reduces susceptibility to aggressive agents and enhances durability.

UHPCs possess compressive strength greater than 120 MPa and tensile strength exceeding 6 MPa after 56 days of curing, while maintaining good workability, with a spread range of 270 mm[4]. Achieving these properties requires a low water/binder ratio (w/b), a high superplasticizer content, the use of high-speed mixers, and a dense cementitious matrix [5].

The packing factor is crucial in distinguishing UHPC from conventional concrete [6]. Packing involves optimizing grain size distribution within the mixture to minimize voids. While it's impossible to eliminate all voids, the goal is to reduce them as much as possible. Remaining voids can be filled during the hydration of cement and pozzolans [2]. Achieving a continuous particle size distribution helps

reduce the wall effect and the loosening effect. The wall effect refers to disturbances around larger aggregates, common in conventional concrete with crushed stone but not in UHPC. The loosening effect involves the separation of aggregates due to discontinuities in particle size distribution [7].

Another key factor in UHPC formulation is the low water/binder (w/b) ratio, which enhances its compressive strength. Given UHPC's high cement content, mineral additives like silica fume are commonly used. Silica fume is popular due to its high specific surface area and silicon oxide (SiO_2) content, often exceeding 85%, with a specific surface area up to 20,000 m^2/kg , earning it the designation of a superpozzolan [8].

Silica is crucial for UHPC's effectiveness; with limited water, cement may not fully hydrate and can act as a filler. Replacing some cement with silica improves efficiency. When in contact with water, silica reacts with calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a byproduct of cement hydration, to form secondary calcium silicate hydrates (C-S-H), which enhances granular packing and mechanical properties [2].

Another additive discussed in this work, though not commonly used in UHPC, is Marble and Granite Waste (MGW). In Brazil, 10.2 million tons of ornamental rocks were produced in 2021, with granite, marble, and similar stones accounting for 7.0 million tons [9]. Consequently, there is a substantial volume of waste generated from material processing that necessitates proper disposal.

MGW typically accumulates in landfills or designated areas within companies, stemming from the cutting, shaping, and polishing processes of rocks [10]. Generally utilized in civil construction in its wet form (slurry), MGW finds application in concrete blocks, conventional concrete, self-compacting concrete, and mortars [11].

The incorporation of MGW in concrete contributes to inertly filling voids and can accelerate cement hydration, enhancing resistance in the transition zone between aggregate and paste [12]., MGW also improves mixture packing and matrix stability. However, it's crucial to carefully determine replacement proportions based on the mixture components to avoid compromising the overall performance of the composite.

This study aims to investigate UHPC formulations incorporating silica and MGW, alongside various mixing methodologies. The goal is to achieve specific parameters that classify the material as UHPC after 56 days: a fresh state test spread of 270 mm, flexural tensile strength of 6 MPa, and compressive strength of 120 MPa in hardened state tests.

The organization of the article initially presents the materials used and their characteristics. Next, in the methodology section, the characterization of the materials is discussed. Following that, the dosing and mixing methods are addressed. Finally, the methods for analyzing UHPC in both fresh and hardened states are presented. The next section covers the results and discussions. Finally, the article ends with the conclusions and references.

II. MATERIALS

The components selected for the UHPC were chosen based on reference compositions found in the literature. The cement used was CP-V, for its high initial strength, greater durability and resistance to aggressive environments. Natural sand, sieved with particle sizes of 2,36mm in the first phase and 600 μm in the second and third phases, was used.

The silica fume chosen comes from the manufacture of ferrosilicon, with characteristics of a high specific surface area, between 15000 m^2/kg and 30000 m^2/kg , and a large amount of silicon dioxide, with a minimum value of 85%. MGW was collected in a tailings pond and subjected to pre-drying in the sun. After drying, the material was manually compiled and subjected to sieving on a 600 μm sieve.

Synthetic superplasticizers were initially based on polycarboxylate polymers (SA) and later switched to polycarboxylate ether (SB) after initial testing revealed improved results. SA has density 1.07 g/cm^3 and solids content between 30.84% and 31.01%. SB has density between 1.067 g/cm^3 and 1.107 g/cm^3 and solids content between 28.5% and 31.5% .

III. METHODOLOGY

3.1 CHARACTERIZATION

The granulometry of the cement and silica was provided by the manufacturer. MGW and sand was characterized. Laser granulometry of MGW was conducted using the Fraunhofer method with 14% obscuration, employing the CILAS 1090 Laser Particle Size Analyzer. To analyze the diameter of the particles, the software “The particle Expert” was used, obtaining the granulometric curve and the parameters d_{10} , d_{50} e d_{90} .

Using the X-ray fluorescence method (XRF), it was possible to identify the chemical composition, based on the fluorescence radiation energy emitted by the MGW. The test was carried out in EDX-720 type equipment with a vacuum atmosphere.

X-ray diffraction (XRD) analysis was also carried out. Using this method, it was possible to analyze the presence of crystalline regions or amorphous halos in the material. Cu-ka tube radiation was used, 2θ scanning range from 5 to 100° . The sweep was 2 degrees/minute, with a current of 30 mA and voltage of 40 kV.

Finally, to understand the morphology of the particles and the production technique of the SAPs, scanning electron microscopy (SEM) was employed using the Hitachi TM 3000. The dried powder samples were subjected to ultrasound for 60 seconds.

For sand, testing procedures and standards adopted are detailed in Table 1.

Table 1. Tests performed and its Regulatory Standards.

Experiment	Regulatory Standard
Sieving granulometry	NM 248 (2001) [13]
Determination of organic impurities	NM 49 (2001) [14]
Determination for pulverulent materials content	NM 46 (2001) [15]
Determination of clay lumps and friable materials content	NBR 7218 (2010) [16]
Determination of density and water absorption	NBR 16916 (2021) [17]
Determination of the unit weight and air-void contents	NBR 16972 (2021) [18]

3.2 DOSAGE AND MIXING

After characterization, the study was divided into three phases based on their chronological execution. Table 2 presents the base formulations for these phases, while Table 3 details the specific changes between each phase, such as variations in additives, the percentage of superplasticizer used, and the water/binder ratio (w/b). Notably, Phase I used substitution for additions, while Phases II and III utilized additional incorporation to reduce w/b and improve compressive strength. Additions were based on mass, with silica added to cement, MGW to sand, and superplasticizer to binders (cement + silica). Method 1, used in Phases I and II, refers to the mixing technique, which was replaced by Method 2 in Phase III. For clarity, for example, the composition M30_S10_SA1.0_0.30 indicates: 30% MGW, 10% silica, SA at 1%, and w/b = 0.30.

Table 2. Mix-designs of references mixtures.

Base dosage – Phase I					
Ciment (kg/m ³)	Silica (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	MGW (kg/m ³)	sp (%)	w/b
384.92	VA	448.80	192.34	VA	VA
Base dosage - Phase II					
Ciment (kg/m ³)	Silica (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	MGW (kg/m ³)	sp (%)	w/b
571.79	114.36	686.14	343.07	VA	0.25
Final dosage - Phase III					
Ciment (kg/m ³)	Silica (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	MGW (kg/m ³)	sp (%)	w/b
571.79	114.36	686.14	343.07	1.50	0.25

Note - VA: Variable according to Table 3

Table 3. Produced dosages of UHPC

Phases	Nomenclature	% sp	Silica	MGW	w/b
Phase I (Mixing Method 1)	M30 S10 SA1.0 0.3	1.00%	10%	30%	0.30
	M30 S15 SA1.0 0.3	1.00%	15%	30%	0.30
	M30 S20 SA1.0 0.3	1.00%	20%	30%	0.30
	M30 S10 SA3.0 0.25	3.00%	10%	30%	0.25
	M30 S10 SA3.5 0.25	3.50%	10%	30%	0.25
	M30 S10 SB3.0 0.25	3.00%	10%	30%	0.25
Phase II (Mixing Method 1)	M50 S20 SB1.0 0.25	1.00%	20%	50%	0.25
	M50 S20 SB1.5 0.25	1.50%	20%	50%	0.25
	M50 S20 SB2.0 0.25	2.00%	20%	50%	0.25
Phase III (Mixing Method 2)	M50_S20_SB1.5_0.25	1.50%	20%	50%	0.25

Mixing Method 1, used in Phases I and II, involved initially mixing binders with half the water and superplasticizer in a tabletop mixer to form a paste. This paste was then transferred to a mortar mixing machine, where inert aggregates, remaining water, and superplasticizer were added. Details are in Table 4. Mixing Method 2, introduced in Phase III, aimed to reduce water loss and improve mixing efficiency. This phase involved changes to the mixer type, mixing times, and speeds, as shown in Table 4.

Table 4. Mixing Methods 1 and 2

Process	Method 1 – Phases I e II			Method 2 – Phase III		
	Action	Time (sec)	Speed (rpm)	Action	Time (sec)	Speed (rpm)
Paste mixture I and II: Low Rotation Mixer III: Drill with screw attachment for mortar	Initial mixture of 25% water + binders	60	-	Only binders	30	2000
	Cleaning break	30	-			
	Mixing of components	60	-	Initial mixture of 50% water + 50% superplasticizer + binders	180	2000
	Cleaning break and addition of 25% water + 50% superplasticizer	30	-			
	Mixing of all the paste components	120	-	Cleaning break	30	-
Mortar (Mortar mixing machine)	Homogenization of aggregates + absorption water	90	Low	Homogenization of aggregates + absorption water	60	Low
	Paste mixture + aggregates	60	High	Initial paste mixture + aggregates	60	Low
				Paste mixture + aggregates	60	High
	Cleaning break and addition of 50% superplasticizer and the remaining water	30	-	Cleaning break and addition of 50% superplasticizer and 50% water	30	-
	Mixing of components	210	High			
	Cleaning break	30	-			
	Mixing of components	120	High	Mixing of components	390	High

3.3 FRESH STATE AND VOLUMETRIC AND MASS VARIATION

For the fresh state analysis, the Spreadind Test [19] was conducted using a consistency table. The material was poured in three layers with 15, 10, and 5 strokes respectively, into a cone with dimensions

of 130 ± 2 mm at the smaller base, 200 ± 2 mm in height, and 200 ± 2 mm at the larger base. After removing the cone, 30 drops were applied within 30 seconds, and diameters were measured at three different points.

Only for the final dosage, Phase III, the variation in volume and mass of the specimens was analyzed. Using three specimens measuring $22 \times 25 \times 285$ mm at ages of 1, 7, and 28 days [20]. Molding was conducted at $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ and a relative humidity of $(60 \pm 5)\%$. Curing conditions were maintained at $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ with a relative humidity of $(50 \pm 5)\%$. Bars were demolded after 48 hours, except for the 1-day test. Dimensional variation (Equation 1) and mass variation (Equation 2) were evaluated.

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (1)$$

$$\Delta m_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad (2)$$

Where: ε_i is the dimensional variation, characterized as retraction when less than zero and expansion when positive. L_i is the reading at final age, in mm and L_0 is the reading after demolding. Δm_i is the mass variation m_i is the mass at final age, in grams and m_0 is the mass after deformation, also in grams. For this test, an expansion and retraction comparator was used, with readings taken with the specimen always in the same position.

3.4 HARDENED STATE

For the hardened state analysis, Phases I and II used prismatic forms ($40 \times 40 \times 160$ mm) for flexural tensile and compressive strength tests. In Phase III, in addition to prismatic forms, cylindrical specimens (50×100 mm) were also used for compression testing. This methodology aimed to reduce deviations observed in the rupture of prismatic specimens. Flexural tensile strength tests were performed using a Shimadzu press with a capacity of up to 10 tons, applying a load rate of 50 N/s with the 3-point method [21]. In Phases I and II, the specimens from this test were then tested for compressive strength using an Amsler press with a capacity of 50 tons at a rate of 500 N/s. Phase III followed a similar procedure, but with cylindrical specimens [21].

In the first two phases, one prismatic specimen was molded for each age group, totaling 3 specimens per dosage, as these phases aimed to define the dosage. In the final phase, three prismatic and three cylindrical specimens were used for each age group. Concrete specimens were demolded after 24 hours and cured in a water and lime solution. Phase I studied ages of 7, 14, and 28 days, focusing on shorter durations for initial testing. Phase II included ages of 7, 28, and 56 days, while Phase III extended to 28, 56, and 91 days to evaluate the material's performance and potential improvements with extended curing times at the final dosage.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1 CHARACTERIZATION - GRANULOMETRY

The granulometric analysis of the selected materials will be carried out together to assess whether the granulometric distribution of the components is different, promoting a reduction in voids in the mixture. All materials underwent laser granulometry analysis, except for sand, which was subjected to sieving. Cement and silica data were provided by their manufacturers. It can be seen in Figure 1 that cement is the finest material, followed by MGW, silica and sand. It is observed that the particle size distributions are very different, which may favor the packing of the mixture.

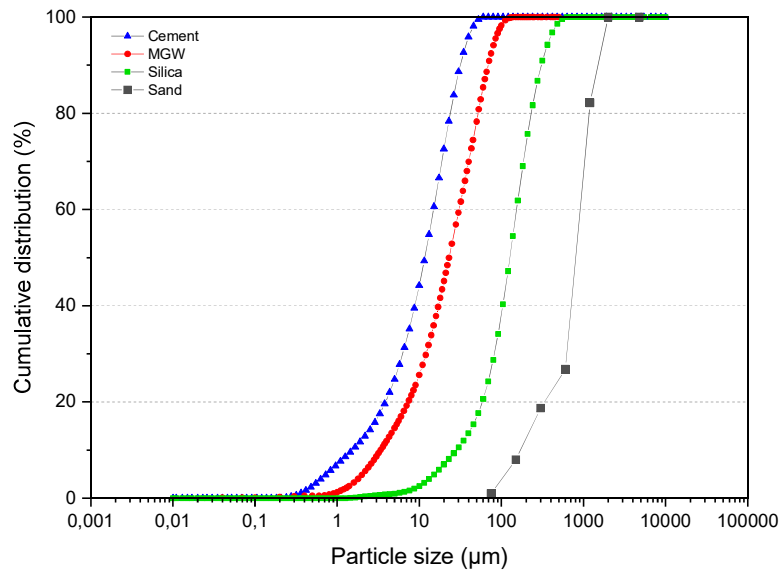


Figure 1. UHPC components diameter

Table 5 details the effective diameter values, specifically D_{10} (diameter at which 10% of the material passes through), D_{50} (median diameter), and D_{90} (diameter at which 90% of the material passes through). The data reveals varying particle sizes among the materials used, which enhances the packaging efficiency of UHPC.

Table 5. Effective diameters of materials used in the study

Material	$D_{10}(\mu\text{m})$	$D_{50}(\mu\text{m})$	$D_{90}(\mu\text{m})$
Cement	1.53	11.68	31.53
MGW	3.39	23.02	69.00
Silica	28.36	126.92	305.87
Sand	90.00	200.00	500.00

4.2 CHARACTERIZATION – SAND

Regarding the organic matter content, Figure 2 shows that the tested solution was only slightly darker than the standard. Using the Hellige reference system, it is concluded that the sand contains insignificant organic matter that would not adversely affect its use in UHPC aggregates.

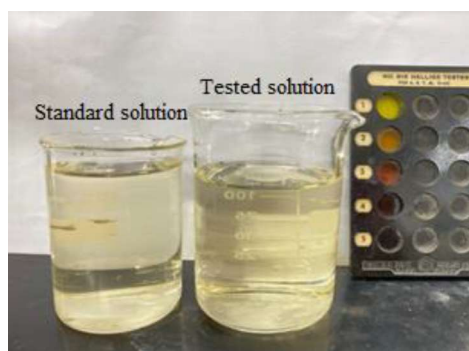


Figure 2. Determination of organic impurities of sand

Table 6 presents other characteristics obtained from sand characterization. The powdery material content was 5%, which includes material with a diameter less than 75 μm , including water-soluble substances, while clay and friable content accounted for 12.8%. Density values fell within the typical range for sand. During batching, the sand exhibited a water absorption of 0.42%, factored into the mixture's water absorption but not considered in the w/b ratio calculation. No characteristics were observed in the sand that could generate setbacks for the concrete.

Table 6. Sand characterization

Pulverulent materials content (%)	5.00
Clay lumps and friable materials content (%)	12.80
Average density dry condition (g/cm^3)	2.47
Average density condition saturated dry surface (g/cm^3)	2.48
Average water absorption (%)	0.42

4.3 CHARACTERIZATION – MGW

Based on the fluorescence radiation energy emitted by MGW upon excitation with X-rays, it was possible to identify the chemical elements present in the material. This information is crucial for understanding the waste composition. Table 7 outlines the composition of the MGW under investigation.

Table 7. Chemical composition of MGW by FRX method

Chemical component %	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	MgO	SO_3	SrO	MnO	RB_2O
	66.52	13.05	8.01	7.06	4.06	0.74	0.17	0.15	0.12	0.04

The material predominantly consists of granite residues, considering that granite's composition is 72% SiO_2 , similar to the chemical composition of the MGW studied [21]. Other observed components are typical in MGW due to the chemical composition of elements found in marble and granite.

Figure 3 presents the mineralogical characterization of MGW using the diffractometry method. Quartz peaks are prominent, especially between 20° and 30° , representing the most abundant material in MGW: SiO_2 (ICSD 89278). Peaks of mica (ICSD 84263) and albite (ICSD 68913), common components of granite, were also identified [22]. Additionally, peaks of dolomite (ICSD 10404) and kaolinite (ICSD 84263) were observed, likely originating from marble present in the residue.

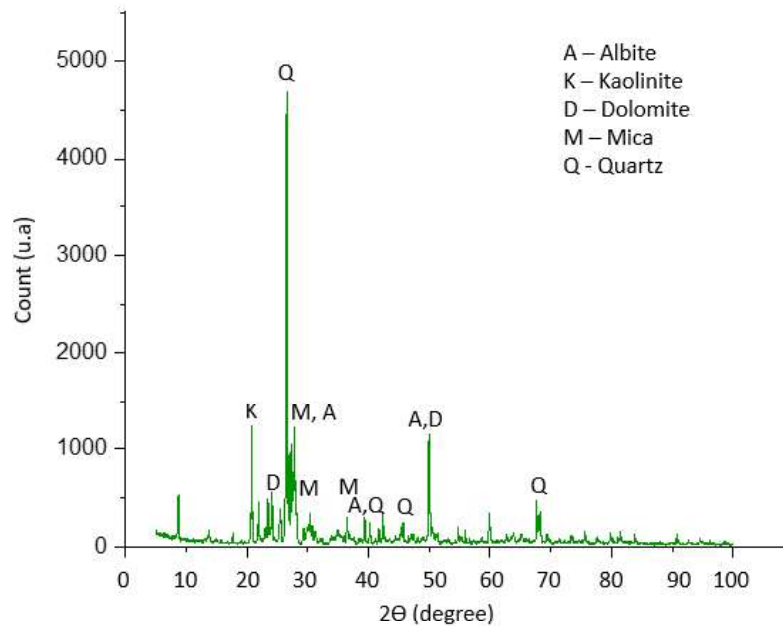


Figure 3. Mineralogical characterization of MGW using the diffractometry method

Figure 4 displays SEM images of MGW. In (a), a 100-fold magnification reveals the irregular and angular morphology of MGW particles, showcasing variability in size and shape due to its nature as a residue, influenced by the original material's cut and composition. At 400x magnification in (b), a particle highlighted by a red arrow exhibits a rough surface texture.

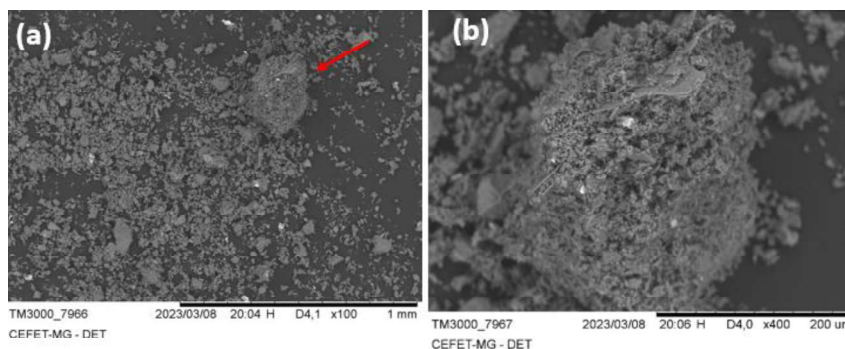


Figure 4. SEM of MGW(a) x110 (b) x400

4.4 ANALYSIS IN THE FRESH STATE AND HARDENED STATE

Initially, MGW was introduced at a 30% replacement rate relative to sand, with silica variations tested at 10%, 15%, and 20%, using 1% superplasticizer and a w/b ratio of 0.30. As shown in Figure 5, all formulations exhibited minimal spread.

Notably, all mixtures with a w/b ratio of 0.30 showed minimal scattering, with the 10% silica dosage achieving the highest value. Since UHPCs typically have a w/b ratio of less than 0.26, a second attempt was made with 10% silica, reducing the w/b ratio to 0.25 and varying the superplasticizer amount. Studies indicate that superplasticizer content in UHPC can reach up to 4%, so 3.0% and 3.5% were tested.

In dosages IV, V, and VI, the increase in superplasticizer was insufficient to achieve the minimum scattering value. This may be due to several factors, such as (i) type and quality of the superplasticizer; (ii) superplasticizer overdose; and (iii) mixing time and application timing of the superplasticizer. Difficulties arise when using superplasticizer with limited water, as inadequate quantity of water

prevents proper dispersion of cement particles [1,7]. Thus, the mixing method, type of superplasticizer, timing of its addition, and w/b ratio all influence the effectiveness of the superplasticizer.

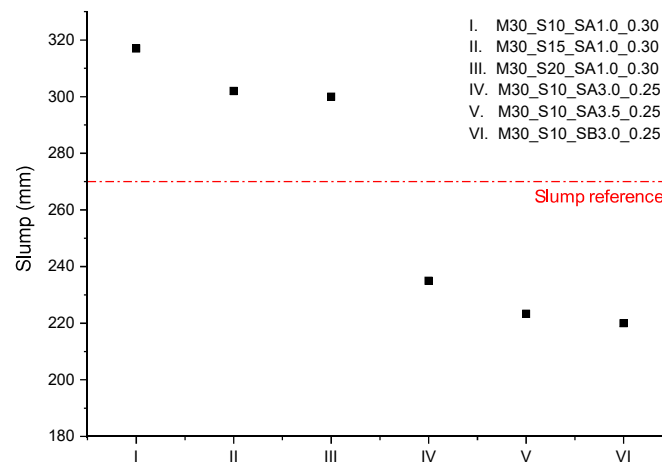


Figure 5. Data obtained for the spreading of dosages - Phase I

Increasing the plasticizer not only reduced the spread but also caused samples with SA to need up to 72 hours for demolding due to insufficient rigidity after 24 hours. This delay may be due to the chemical nature and amount of the superplasticizer used, which slowed the concrete's structural formation. Replacing the SB superplasticizer eased the demolding issue but did not achieve the desired spreading, prompting exploration of alternative methods with SB in later phases.

As shown in Figure 6, flexural tensile strength results I, II, and III exceeded 6 MPa at all ages. There was more consistency between age and resistance in dosages with 15% and 20% silica. For dosages IV, V, and VI, only dosage VI met the predicted minimum. The demolding and curing process for dosages with 3% and 3.5% SA superplasticizer significantly impacted the results.

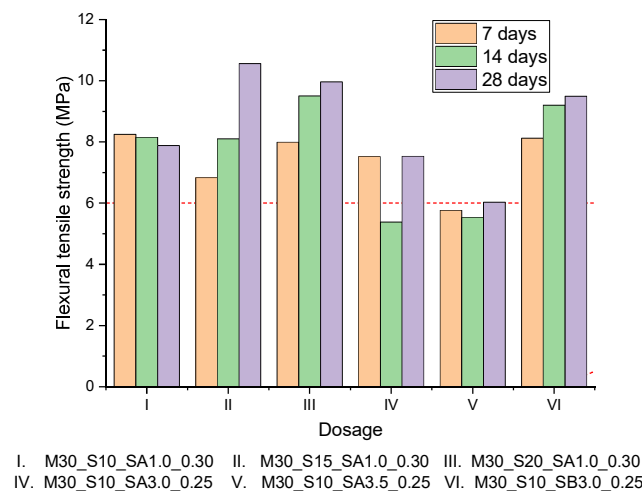


Figure 6. Flexural tensile strength - Phase I

In Figure 7 it is possible to observe the gain in resistance as the percentage of silica increases. The result with 20% silica stands out, which reached higher values after 28 days, but still did not reach the minimum resistance for classification as UHPC. As for the proposal for dosages with a higher superplasticizer content, the same behavior as before is observed, with worse results for dosages with SA. However, there was a drop at 28 days for the use of SB. This behavior is attributed to a failure in the molding process or test execution. Substituting the superplasticizer resulted in a improvement in strength, underscoring the potential of this modification.

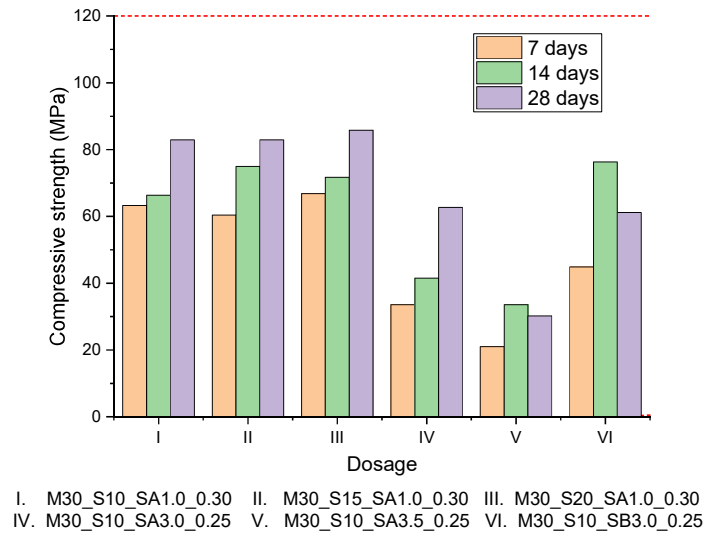


Figure 7. Compressive strength - Phase I

After completing Phase I and analyzing the results, it was decided to use SB superplasticizer at concentrations of 1%, 1.5%, and 2%, and to add 20% silica fume, aiming for a w/b ratio of 0.25. Additionally, changes were made to the sand granulometry (600 μ m) and curing time. The 20% silica dosage was chosen due to the good results obtained in the fresh and hardened state and because it provides the greatest amount of binder in the mixture, which could enhance shrinkage resistance.

Figure 8 shows the spread value for Phase II dosing. It is possible to note that 1% superplasticizer proved to be insufficient to obtain the minimum value. The dosages with 1.5% and 2% reached the minimum, with emphasis on the composition with 1.5%. This behavior, as described previously, is related to the search for the ideal dosage of superplasticizer that can act efficiently with the w/b factor of the mixture.

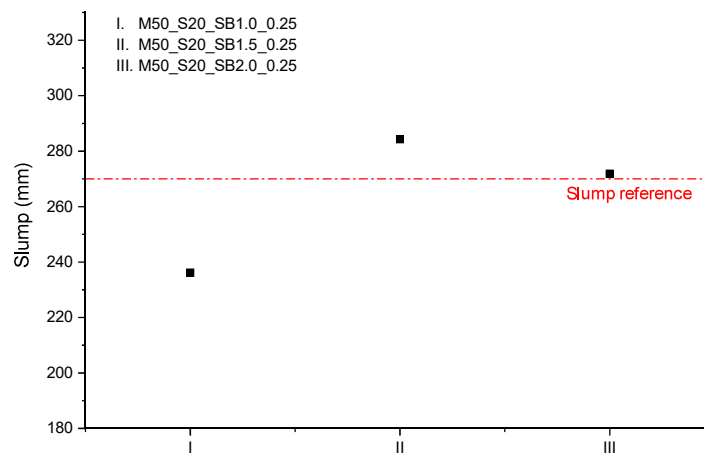


Figure 8. Data obtained for the spreading of dosages – Phase II

All results for flexural tensile strength met the stipulated minimum (Figure 9). Dosages I and II showed less significant gains with age. However, all results were considered favorable considering that the minimum resistance value was obtained after 7 days of curing.

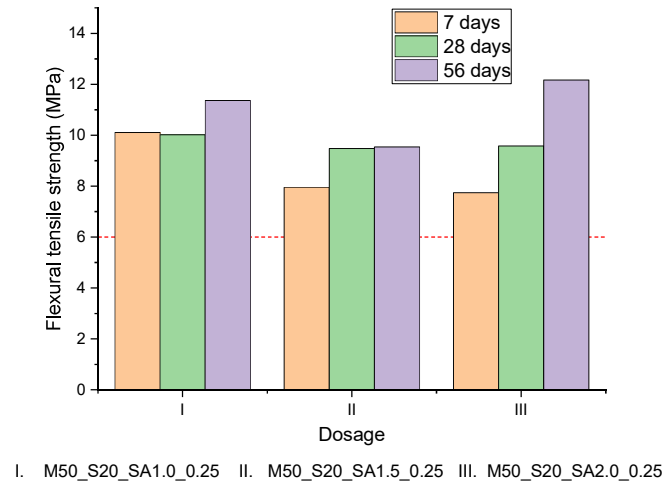


Figure 9. Flexural tensile strength - Phase II

It is noted that the proposed dosage changes brought very significant improvements to compression resistance (Figure 10). All results at 7 days are close to 80 MPa. I and II show results close to 100 MPa at 56 days. Therefore, it is observed that changing the sand size and curing time was beneficial for the study.

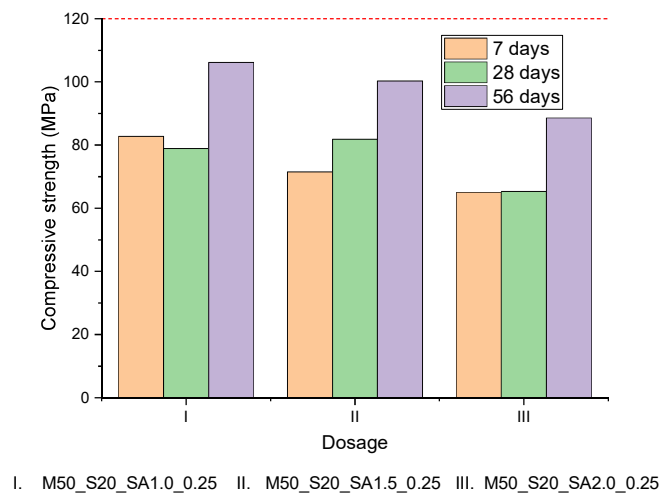


Figure 10. Compressive strength - Phase II

Therefore, knowing that the dosage M50_S20_SB1.5_0.25 presented: (i) a higher scattering value; (ii) the minimum value for flexural strength reached at all ages; and (iii) coherence between resistance and age in the compression analysis, reaching 100 MPa at 56 days, this dosage was chosen for Phase III. To improve the chosen dosage and achieve the parameters for classification as UHPC, adjustments were made to the mortar production process and curing time (28, 56, and 91 days), with the results shown in Figure 11.

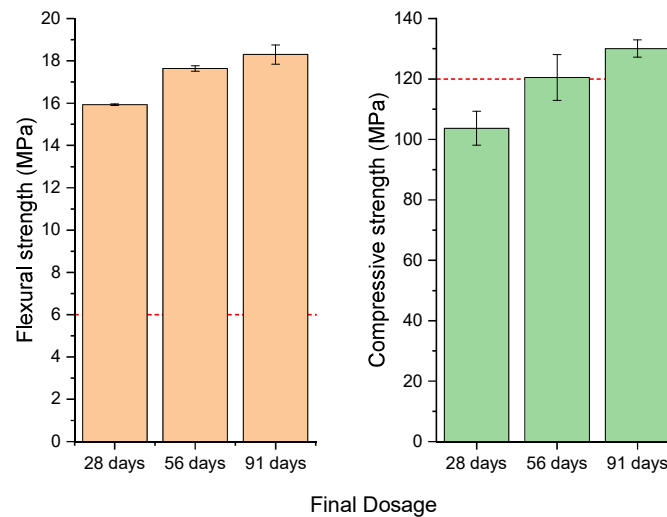


Figure 11. Flexural tensile strength and compressive strength – Final Dosage

The dosage achieved a spread of 284 mm, exceeding the desired 270 mm. In the resistance analysis (Figure 11), the dosage showed flexural tensile strength above the minimum at all ages, reaching 18.3 MPa at 91 days. For compressive strength, it reached 103.7 MPa at 28 days, surpassed the normative minimum at 56 days with 120.5 MPa, and reached 130 MPa at 91 days. Thus, the material met the three criteria for UHPC classification. This highlights the influence of factors like material types, granulometry, superplasticizer type, and mixing method on producing UHPC.

4.5 VOLUMETRIC AND MASS VARIATION

Finally, the volumetric and mass variation of the UHPC obtained was analyzed, as shown in Figure 12. It was observed that the specimen shrank with the evolution of the curing process. This behavior may be linked to drying shrinkage and autogenous shrinkage, which are very common in UHPCs due to the low w/b factor. The mass variation obtained was consistent with the volume variations. These variations are understood to be linked to the loss of water from the material during the curing process.

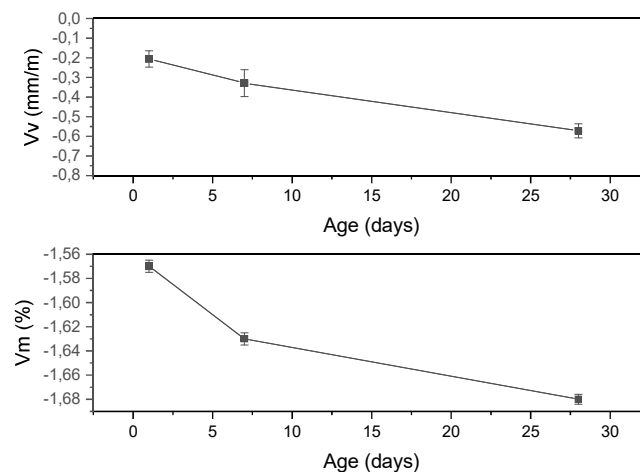


Figure 12. Volumetric and mass variation – Final Dosage

V. CONCLUSIONS

In summary, this study provided a detailed analysis of UHPC dosing, investigating both the behavior in the fresh state and the mechanical properties in the hardened state with the addition of silica and MGW. The influence of curing times, types and percentages of superplasticizer, as well as production

methods, were evaluated. This allowed for an observation of how the constituent materials and their proportions impact the desired characteristics of UHPC. The additions of silica and MGW improved the matrix packaging, increasing the workability and resistance of the UHPC, especially at more advanced ages. This demonstrates the potential for future work, such as the addition of fibers.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the AECem research network (Advanced Eco-Efficient Cement-Based Technologies) for their valuable contributions to the research, to the Research Support Foundation of the State of Alagoas for financial support (FAPEAL), and to the Federal University of Alagoas and the Federal Institute of Alagoas for infrastructure and team support.

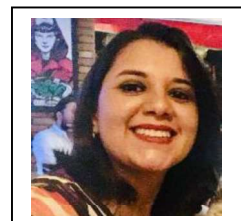
REFERENCES

- [1]. Fan D., Zhu J., Fan M., Lu J., Chu S. H., and Dong E., (2003) “Intelligent design and manufacturing of ultra-high performance concrete (UHPC) – A review,” vol. 385.
- [2]. Christ R., B. & Tutiakian, P. Helene, (2022) “Concreto de ultra alto desempenho: UHPC - Fundamentos, propriedades e dosagem,” 1ª ed. São Paulo.
- [3]. Zhu Y., Zhang Y., Hussein H. H., & Chen G., (2020) “Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review,” Eng Struct, vol. 205, p. 110035, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110035.
- [4]. Perry V. H. & America N., (2020) “What Really is Ultra-High Performance Concrete? Towards a Global Definition,” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/340441896>.
- [5]. Li J., Wu Z., Shi C., Yuan Q., & Zhang Z., (2020) “Durability of ultra-high performance concrete – A review,” Construction and Building Materials, vol. 255. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119296.
- [6]. Manzano M. A. Silva R., E. F. da, Lopes A. N. de M., & Tolêdo Filho R. D., (2021) “Mecanismo de atuação dos Polímeros Superabsorventes como agentes de cura interna para mitigar a retração autóloga em Concretos de Alta Resistência (CAR) – Estado da Arte,” Matéria (Rio de Janeiro), vol. 26, no. 2, doi: 10.1590/s1517-707620210002.1256.
- [7]. De Larrard F. & Sedran T., (2002) “Mixture proportioning of high-performance concrete,” Cem Concr Res, vol. 32, no. 11, pp. 1699–1704, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00861-X.
- [8]. Silva V., M. G.; Battagin & Gomes A. F. (2017), “Cimento Portland com Adições Minerais,” in Concreto: Ciência e Tecnologia, São Paulo, p. p.793-841.
- [9]. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS (2021), “Balanço das exportações e importações brasileiras de materiais rochosos naturais e artificiais de ornamentação e revestimento em 2021.” Brasília, p. 17. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/03/Informe-01_2022-Exportacoes-2021.pdf
- [10]. Singh M., Choudhary K., Srivastava A., Singh Sangwan K., & Bhunia D. (2017), “A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete,” Journal of Building Engineering, vol. 13, no. July, pp. 87–95, doi: 10.1016/j.jobbe.2017.07.009.
- [11]. Pereira M. M. L., Capuzzo V. M. S., & Lameiras R. de M. (2022), “Evaluation of use of marble and granite cutting waste to the production of self-compacting concrete,” Constr Build Mater, vol. 345, no. February, p. 128261, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128261.
- [12]. Galetakis M. & Soultana A. (2016), “A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector,” Constr Build Mater, vol. 102, pp. 769–781, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.204.
- [13]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2001), NBR NM 248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.
- [14]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2001), NM 49 . Agregado miúdo. Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro 2001.

- [15]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2001), NM 46 . Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro.
- [16]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2010), NBR 7218 . Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro.
- [17]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021), NBR 16916 . Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro.
- [18]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021), NBR 16972 . Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro.
- [19]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016). NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro.
- [20]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2005), NBR 15261. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro.
- [21]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2005). NBR 13279. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro.
- [22]. Barbosa K. S. L., Carneiro M. de S., Souza J. A. da S., Costa D. da S., & Macedo E. N., (2022) “Resíduos de mármore e granito em materiais compósitos: relação da granulometria nas propriedades mecânicas,” Conjecturas, vol. 22, no. 2, pp. 1319–1331 , doi: 10.53660/conj-833-f04.

Authors

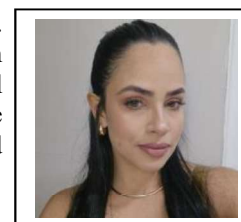
Priscila de Souza Maciel graduated in Civil Engineering from the Federal University of Ouro Preto (2015) and a master's degree in Geotechnics (Research Line: Rigid Pavement Infrastructure with Steel Fiber Reinforcement) from the same institution (NUGEO/UFOP), completed in 2017. Worked at IFPB in 2020 and is currently a full professor at the Federal Institute of Alagoas, Campus Coruripe, teaching in the technical building course and pursuing a Ph.D. in Materials Science at the Federal University of Alagoas. Interested in the following topics: paving, UHPC, fiber-reinforced concrete, SAP



Maria Luiza Malta da Rocha Silva undergraduate student in Civil Engineering at the Federal University of Alagoas - A. C. Simões Campus. Researcher in the field of Materials.



Ingrid Vieira Fernandes Monteiro pharmacist from the Federal University of Alagoas. Master's degree in Pharmaceutical Sciences from the Postgraduate Program in Pharmaceutical Sciences at UFAL (PPGCF-UFAL). Currently, PhD student in Material Sciences (UFAL). She has experience in nanotechnology, with an emphasis on the development and characterization of polymeric nanocomposites and nanostructured bioinsecticide formulations.



Paulo Cesar Correia Gomes. Graduated in Civil Engineering from the Federal University of Alagoas. Master's in Civil Engineering from the Federal University of Rio de Janeiro. PhD from the Polytechnic University of Catalonia - Building Engineering. Post-doctorate from the Polytechnic School of the University of São Paulo. Professor at the Federal University of Alagoas. Research in Civil Engineering, with an emphasis on concrete technology, special concretes and non-conventional materials, working mainly on the subjects: construction waste, self-compacting concrete, lightweight concrete, fiber concrete, eco-efficient concrete, sustainable technology and construction elements.

